

明細書

フォトマスク、そのフォトマスクを用いたパターン形成方法及びマスクデータ作成方法

技術分野

本発明は、半導体集積回路装置等の製造に用いられる微細パターン形成用のフォトマスク及びその設計方法に関する。

背景技術

近年、半導体を用いて実現する大規模集積回路装置（以下、LSIと称する）の高集積化のために、回路パターンの微細化がますます必要となってきている。その結果、回路を構成する配線パターンの細線化が非常に重要となってきた。

以下、従来の光露光システムによる配線パターンの細線化について、ポジ型レジストプロセスを用いる場合を例として説明する。ここで、ラインパターンとは、レジスト膜における露光光によって感光されない部分、つまり現像後に残存するレジスト部分（レジストパターン）である。また、スペースパターンとは、レジスト膜における露光光によって感光される部分、つまり現像によりレジストが除去されてなる開口部分（レジスト除去パターン）である。尚、ポジ型レジストプロセスに代えてネガ型レジストプロセスを用いる場合、前述のラインパターン及びスペースパターンのそれぞれの定義を入れ替えればよい。

従来、光露光システムを用いてパターン形成を行なう場合、石英等からなる透明な基板（透過性基板）上にCr（クロム）等からなる完全遮光パターンが所望のパターンと対応するように描かれたフォトマスクを用いていた。このような、フォトマスクにおいては、Crパターンが存在する領域は、ある波長の露光光を全く透過させない（実質的に透過率0%の）遮光部となる一方、Crパターンが

存在しない領域（開口部）は、前述の露光光に対して透過性基板と同等の透過率（実質的に 100% の透過率）を持つ透光部となる。そして、このフォトマスクを用いて、レジストが塗布されたウェハの露光を行なった場合、遮光部はレジストの非感光部と対応すると共に開口部（透光部）はレジストの感光部と対応する。従って、このようなフォトマスク、つまり、ある波長の露光光に対しての遮光部及び透光部から構成されるフォトマスクはバイナリーマスクと呼ばれる。

しかしながら、前述のバイナリーマスクを用いて露光波長（露光光の波長）以下の微細パターンの形成を行なうことは、光の回折現象によって困難である。そこで、近年、光の位相を反転させる機能を有したマスクパターン、つまり位相シフターが設けられたフォトマスクが利用されるようになってきた。さらには、微細パターン形成におけるコントラスト及び D O F (depth of focus) を大幅に向上させるフォトマスクとして、本願発明者により見出されたマスクエンハンサー構造を持つマスク（イメージ強調マスク）を用いることによってパターン形成を行なう方法もある。マスクエンハンサー構造は、基本的には、位相シフターと Cr パターン等の遮光性パターンとから構成される（例えば「特許協力条約に基づいて公開された国際出願 PCT/JP00/07772（国際公開番号 WO 01/35166 A1）」（以下、文献 1 という）参照）。

図 19 (a) はイメージ強調マスクの平面構成の一例を示しており、図 19 (b) は、図 19 (a) に示すマスクに対して露光を行なった際に被露光材料上における線分 A A' と対応する位置に形成される光の振幅強度を示している。

図 19 (a) 及び (b) に示すように、イメージ強調マスクにおいては、Cr 膜等の遮光膜よりなるパターン（遮光部）の内部に、透光性の位相シフターが設けられており、それによって、露光時に形成される光強度分布のコントラストを強調することができる。

ところで、図 19 (a) に示すイメージ強調マスクは、図 19 (c) に示す、遮光部（遮光パターン）が透光部に囲まれたマスクと、図 19 (d) に示す、位

相シフターが遮光に囲まれたマスクとが組み合わされたものである。尚、図 19 (e) は、図 19 (c) 及び図 19 (d) のそれぞれに示すマスクに対して露光を行なった際に被露光材料上における線分 A A' と対応する位置に形成される光の振幅強度を示している。

図 19 (c) 及び (e) に示すように、ライン状の遮光部（具体的には Cr パターン）が単独に存在するマスクを用いた場合に形成される光強度分布においては、Cr パターンの線幅が狭くなるに従って、Cr パターン周辺からの光の回り込みによって、Cr パターン中心（つまりマスクパターン中心）での光強度が増加する。すなわち、遮光パターンであるにも関わらず、光を十分に遮光できなくなる。よって、十分な遮光性を実現できないため、光強度分布のコントラストが低くなる。

一方、図 19 (d) 及び (e) に示すように、透光部を基準として反対位相の光を透過させる位相シフターを用いた場合、この位相シフターを透過する光と、透光部を透過する光とを干渉させることができれば、それらの光は互いに打ち消しあうことになる。よって、Cr 膜によって十分に光を遮光することができない線幅のパターンについては、その Cr パターンの内部に透過性の位相シフターを形成することにより、位相シフターを透過した光と、Cr パターン周辺の透光部を透過して Cr パターンの裏側に回り込んだ光とを干渉させることができるとなる結果、非常に遮光性の高いマスクパターンを実現できる。このように、遮光性のマスクパターンの内部に、透光部を透過した光を打ち消すための位相シフターを設けた構造をマスクエンハンサー構造と呼ぶ。

尚、以上の説明において、マスクエンハンサー構造が Cr 膜等の遮光膜と位相シフターとから構成されるものとして説明してきたが、マスクエンハンサー構造において遮光膜を半遮光膜に置き換えるても同様の効果が得られる。半遮光膜は光を部分的に透過させるものであって、半遮光膜を透過する光と透光部を透過する光とは同位相の関係にある。

また、マスクエンハンサー構造を持つマスクを用いたパターン形成においては、Cr幅と位相シフター幅との組み合わせによって、光強度分布のコントラストが増加したり減少したりすると共にプロセスマージンも増加したり減少したりする。前述の文献1には、孤立パターン形成におけるプロセスマージンを増加させる方法として、太いCrパターン内に細い位相シフターを設け、且つ細いCrパターン内に太い位相シフターを設けることが開示されている。

前述のように、孤立パターンのみを有するフォトマスクにマスクエンハンサー構造を適用する場合、太いCrパターン内に細い位相シフターを設け、且つ細いCrパターン内に太い位相シフターを設けることによって、高いプロセスマージンを実現できる。しかしながら、孤立パターンのみではなく、任意のパターン配置が混在した複雑なパターンを有するフォトマスクにマスクエンハンサー構造を適用する場合、Crパターン幅に応じて位相シフター幅を変えるという単純な方法によって、プロセスマージンの向上効果を十分に得ることはできない。

発明の開示

前記に鑑み、本発明は、任意のパターン配置が混在した複雑なパターンを有するフォトマスクにマスクエンハンサー構造を適用する場合にも、プロセスマージンの向上効果が十分に得られるようにすることを目的とする。

ところで、マスクエンハンサー構造の適用対象となるパターンの周囲に該パターンに近接する他のパターンが存在する状況においては、プロセスマージンを増加させるための条件は複雑になる。なぜなら、通常のバイナリーマスクにおいても、着目するパターンに対して近接する他のパターンが存在する場合には、近接する他のパターンを考慮してマスク寸法やマスク形状を変化させなければならない。通常、このような操作を行なうことをOPC (optical proximity correction) と呼ばれる。従って、マスクエンハンサー構造を有するパターンの線幅のみに基づいて該パターンの構成を決定するという単純な方法によって、任意のパ

ーン配置が混在した複雑なパターンを有するフォトマスクによる露光においてプロセスマージンを向上させることは困難である。

そこで、本願発明者は、マスクエンハンサー構造の適用対象となるパターンの周囲に該パターンに近接する他のパターンが存在する状況においてもプロセスマージンを増加させることができるマスク構成について種々の検討を行なった。その結果、近接する他のパターンとの間の距離が小さくなるに従って、マスクエンハンサー構造を有するパターンにおける位相シフター幅を小さくするというマスク構成によって、任意のパターン配置が混在した複雑なパターンの場合にもプロセスマージンが向上することが判明した。

本発明は、以上の知見に基づきなされたものであって、具体的には、本発明に係る第1のフォトマスクは、透過性基板上に形成されたマスクパターンと、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクであって、マスクパターンは、透光部を基準として露光光を反対位相で透過させる位相シフターと該位相シフターを囲む遮光部とからなるマスクエンハンサー構造をそれぞれ持つ第1パターン及び第2パターンを有し、第1パターンは、透光部を挟んで所定の寸法以下の距離で、マスクパターンのうちの第3パターンと近接しており、第1パターンにおけるマスクエンハンサー構造の位相シフター幅は、第2パターンにおけるマスクエンハンサー構造の位相シフター幅よりも小さい。

第1のフォトマスクによると、所定の寸法以下の距離で他のパターン（第3パターン）と近接する第1パターンのマスクエンハンサー構造において、位相シフター幅を相対的に小さくする。このため、近接する他のパターンの存在によって、第1パターンの周辺の透光部から第1パターンの裏側に回り込んでくる光（透光部と同位相の光）が減少する程度に応じて、第1パターンの内部（位相シフター）を透過する光（透光部と反対位相の光）を減少させることができる。従って、第1パターンの遮光性を十分に向上させることができるために、露光マージンが

向上すると共に、露光により形成される光強度分布のコントラストが向上する。すなわち、孤立パターンのみではなく、パターン同士が互いに近接するような複雑なパターンが存在するフォトマスクにおいても、マスクエンハンサー構造によりプロセスマージンの向上効果が十分に得られる。また、マスクエンハンサー構造における位相シフター幅を各パターン間の近接関係に応じて最適化することができるので、ランダムなパターン配置の微細パターンの形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

尚、第1のフォトマスクにおいて、第1及び第2パターンはそれぞれ例えばラインパターンであり、該ラインパターンと同一の外形形状を有する遮光部と、該遮光部の内部に設けられた位相シフター（ライン状）とから構成されている。また、例えば第1パターンがラインパターンである場合には、第1パターンのライン方向に対して垂直な方向に第3パターンが存在していてもよい。

第1のフォトマスクにおいて、透光部における第2パターンの両側の領域は所定の寸法よりも大きい幅を有していてもよい。或いは、第2パターンは孤立していてもよい。すなわち、例えば第2パターンがラインパターンである場合には、第2パターンのライン方向に対して垂直な方向に他のパターンが存在していなくてもよい。ここで、第3パターンは、マスクエンハンサー構造を持つか又は遮光部よりなる。但し、第3パターンにおけるマスクエンハンサー構造の遮光部に代えて、透光部を基準として露光光を同位相で且つ部分的に透過させる半遮光部が設けられていてもよい。

第1のフォトマスクにおいて、第2パターンは、透光部を挟んで所定の寸法以下の距離で、マスクパターンのうちの第4のパターンと近接しており、第2パターンと第4パターンとの間の距離は、第1パターンと第3パターンとの間の距離よりも大きくてよい。ここで、第3パターン及び第4パターンは、マスクエンハンサー構造を持つか又は遮光部よりなる。但し、第3パターン及び第4パターンのそれぞれにおけるマスクエンハンサー構造の遮光部に代えて、透光部を基準

として露光光を同位相で且つ部分的に透過させる半遮光部が設けられていてもよい。

第1のフォトマスクにおいて、第2パターンは、透光部を挟んで、第1パターンと第3パターンとの間の距離と同等（略同等を含む）の距離で、マスクパターンのうちの第5のパターンと近接しており、第3パターンはマスクエンハンサー構造を持ち、第5パターンは遮光部より構成されていてもよい。ここで、第3パターンにおけるマスクエンハンサー構造の遮光部に代えて、透光部を基準として露光光を同位相で且つ部分的に透過させる半遮光部が設けられていてもよい。

第1のフォトマスクにおいて、第1パターンと第2パターンとは接続しており、それによって1つの連続パターンが構成されていてもよい。例えば第1及び第2パターンがラインパターンである場合、ライン方向に沿って第1及び第2パターンが接続してもよい。

第1のフォトマスクにおいて、所定の寸法が $(\lambda / NA) \times M$ （但し、 λ は露光光の波長であり、M及びNAは露光機の縮小投影光学系の縮小倍率及び開口数である）以下であると、前述の効果が確実に得られる。

第1のフォトマスクにおいて、第1パターン及び第2パターンのそれぞれの幅が $(0.8 \times \lambda / NA) \times M$ （但し、 λ は露光光の波長であり、M及びNAは露光機の縮小投影光学系の縮小倍率及び開口数である）以下であると、前述の効果が確実に得られる。ここで、第1パターン及び第2パターンのそれぞれを被露光材料に転写することによって形成しようとする所望のパターン（例えばレジストパターン）のそれぞれの幅が同じである場合でも、第1パターンの幅と第2パターンの幅とは必ずしも同じでなくてもよい。但し、第1パターンの幅と第2パターンの幅との差は $(0.2 \times \lambda / NA) \times M$ 以下であることが好ましい。このようにすると、第1パターン及び第2パターンに同じ幅の位相シフターを設けた場合にも、各パターンに対する露光において十分なコントラストが得られる。この場合、第1パターンにおけるマスクエンハンサー構造の位相シフター幅の第1パ

ターンの幅に対する比が、第2パターンにおけるマスクエンハンサー構造の位相シフター幅の第2パターンの幅に対する比よりも小さくてもよい。

第1のフォトマスクにおいて、第1パターン及び第2パターンのそれぞれにおけるマスクエンハンサー構造の遮光部に代えて、透光部を基準として露光光を同位相で且つ部分的に透過させる半遮光部が設けられていてもよい。ここで、半遮光部は、透光部を基準として露光光を $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下の位相差で透過させる。すなわち、本明細書において、同位相とは、 $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下の位相差を意味する。また、半遮光部は、例えば厚さ30nm以下の金属薄膜よりなる。

第1のフォトマスクにおいて、第1パターン及び第2パターンのそれぞれにおけるマスクエンハンサー構造の位相シフターは、透光部を基準として露光光を $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下の位相差で透過させる。すなわち、本明細書において、反対位相とは、 $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下の位相差を意味する。

第1のフォトマスクにおいて、第1パターン及び第2パターンのそれぞれにおけるマスクエンハンサー構造の位相シフターは、透過性基板を掘り下げることにより形成されていることが好ましい。

このようにすると、位相シフターの透過率として、透過性基板（透光部）と同等の透過率（実質的に100%の透過率）を実現できる。

本発明に係る第2のフォトマスクは、透過性基板上に形成されたマスクパターンと、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクであって、マスクパターンは、透光部を基準として露光光を反対位相で透過させる位相シフターと該位相シフターを囲む遮光部とからなるマスクエンハンサー構造を持つ一のパターンと、透光部を挟んで一のパターンと隣り合う他のパターンとを有し、一のパターンにおけるマスクエンハンサー構造の位相シ

フター幅は、一のパターンと他のパターンとの間の距離が小さくなるに従って小さく設定される。

第2のフォトマスクによると、隣り合う他のパターンとの間の距離が小さくなるに従って、マスクエンハンサー構造を有する一のパターンにおける位相シフター幅を小さくする。このため、隣り合う他のパターンの存在によって、一のパターンの周辺の透光部から一のパターンの裏側に回り込んでくる光（透光部と同位相の光）が減少する程度に応じて、一のパターンの内部（位相シフター）を透過する光（透光部と反対位相の光）を減少させることができる。従って、一のパターンの遮光性を十分に向上させることができるために、露光マージンが向上すると共に、露光により形成される光強度分布のコントラストが向上する。すなわち、孤立パターンのみではなく、パターン同士が互いに近接するような複雑なパターンが存在するフォトマスクにおいても、マスクエンハンサー構造によりプロセスマージンの向上効果が十分に得られる。また、マスクエンハンサー構造における位相シフター幅を各パターン間の近接関係に応じて最適化することができるので、ランダムなパターン配置の微細パターンの形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

本発明に係る第3のフォトマスクは、透過性基板上に形成されたマスクパターンと、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクであって、マスクパターンは、透光部を基準として露光光を反対位相で透過させる位相シフターと該位相シフターを囲む遮光部とからなるマスクエンハンサー構造を持つ一のパターンと、透光部を挟んで一のパターンと隣り合う他のパターンとを有し、一のパターンにおけるマスクエンハンサー構造の位相シフター幅は、他のパターンが遮光部よりなる場合と比べて、他のパターンがマスクエンハンサー構造を持つ場合に、より小さく設定される。

第3のフォトマスクによると、隣り合う他のパターンが遮光部よりなる場合と比べて、該他のパターンがマスクエンハンサー構造を持つ場合に、マスクエンハ

ンサー構造を有する一のパターンにおける位相シフター幅をより小さくする。すなわち、他のパターンの遮光性が高くなるに従って、一のパターンにおける位相シフター幅を小さくする。このため、隣り合う他のパターンの存在によって、一のパターンの周辺の透光部から一のパターンの裏側に回り込んでくる光（透光部と同位相の光）が減少する程度に応じて、一のパターンの内部（位相シフター）を透過する光（透光部と反対位相の光）を減少させることができる。従って、一のパターンの遮光性を十分に向上させることができるために、露光マージンが向上すると共に、露光により形成される光強度分布のコントラストが向上する。すなわち、孤立パターンのみではなく、パターン同士が互いに近接するような複雑なパターンが存在するフォトマスクにおいても、マスクエンハンサー構造によりプロセスマージンの向上効果が十分に得られる。また、マスクエンハンサー構造における位相シフター幅を、隣り合う他のパターンの遮光性に応じて最適化することができるので、ランダムなパターン配置の微細パターンの形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

本発明に係るパターン形成方法は、本発明の各フォトマスクを用いたパターン形成方法を前提とし、基板上にレジスト膜を形成する工程と、レジスト膜に本発明のフォトマスクを介して露光光を照射する工程と、露光光を照射されたレジスト膜を現像してレジストパターンを形成する工程とを備えている。

本発明のパターン形成方法によると、本発明の各フォトマスクと同様の効果が得られる。また、本発明のパターン形成方法において、露光光を照射する工程で斜入射照明法を用いることが好ましい。このようにすると、フォトマスクを透過した光の光強度分布において、マスクパターン及び透光部のそれぞれと対応する部分の間でのコントラストが向上する。また、光強度分布のフォーカス特性も向上する。従って、パターン形成における露光マージン及びフォーカスマージンが向上する。言い換えると、デフォーカス特性に優れた微細パターン形成が可能となる。さらには、フォトマスク上においてマスクエンハンサー構造を持つパー

ン同士が近接する場合にも、露光時における各パターンのコントラストが大きく向上する。

本発明に係るマスクデータ作成方法は、透過性基板上に形成されたマスクパターンと、透過性基板におけるマスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクのマスクデータ作成方法であって、フォトマスクを介して露光光をレジストに照射することによって形成されるレジストの所望の非感光領域と対応するパターンを作成する工程と、パターンの内部に配置され且つ透光部を基準として露光光を反対位相で透過させる位相シフターの形状を決定する工程と、パターンと透光部を挟んで近接する他のパターンからパターンまでの距離に基づいて、位相シフターの幅を調整する工程と、パターンにおける透光部との境界となるエッジをCD調整用エッジに設定する工程と、シミュレーションを用いて、位相シフターが配置されたパターンにより形成されるレジストパターンの寸法を予測する工程と、予測されたレジストパターンの寸法が所望の寸法と一致しない場合、CD調整用エッジを移動させることによりパターンの変形を行なう工程とを備えている。

本発明のマスクデータ作成方法によると、近接する他のパターンから、マスクエンハンサー構造を有するパターン（対象パターン）までの距離に基づいて、マスクエンハンサー構造の位相シフターの幅を調整する。このため、例えば、他のパターンとの間の距離が小さくなるに従って位相シフター幅を小さくすることにより、他のパターンの存在によって、対象パターンの周辺の透光部から対象パターンの裏側に回り込んでくる光（透光部と同位相の光）が減少する程度に応じて、対象パターンの内部（位相シフター）を透過する光（透光部と反対位相の光）を減少させることができる。従って、対象パターンの遮光性を十分に向上させることができるために、露光マージンが向上すると共に、露光により形成される光強度分布のコントラストが向上する。すなわち、孤立パターンのみではなく、パターン同士が互いに近接するような複雑なパターンが存在するフォトマスクにおいて

ても、マスクエンハンサー構造によりプロセスマージンの向上効果が十分に得られる。また、マスクエンハンサー構造における位相シフター幅を各パターン間の近接関係に応じて最適化することができるので、ランダムなパターン配置の微細パターンの形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

本発明のマスクデータ作成方法において、パターンは、透光部を基準として露光光を同位相で透過させる半遮光部を有していてもよい。

本発明のマスクデータ作成方法において、位相シフターの形状を決定する工程は、位相シフターの幅として、少なくとも2つ以上の異なる幅を設定する工程と、パターンが所定の幅以下の細い幅を持つ場合における位相シフターの幅を、パターンが所定の幅を越える幅を持つ場合における位相シフターの幅よりも大きく設定する工程とを含むことが好ましい。

このようにすると、孤立パターン形成におけるプロセスマージンを増加させることができること。

本発明のマスクデータ作成方法において、位相シフターの幅を調整する工程は、位相シフターの幅として、少なくとも2つ以上の異なる幅を設定する工程と、パターンと他のパターンとの間隔が所定の寸法以下である場合の位相シフターの幅を、パターンと他のパターンとの間隔が所定の寸法よりも大きい場合の位相シフターの幅よりも小さく設定する工程とを含むことが好ましい。

このようにすると、本発明のマスクデータ作成方法による前述の効果を確実に得ることができること。

本発明のマスクデータ作成方法において、位相シフターの幅を調整する工程は、位相シフターの幅として、少なくとも2つ以上の異なる幅を設定する工程と、パターンが所定の寸法以下の間隔で他のパターンと近接すると共に他のパターンに他の位相シフターが配置される場合における位相シフターの幅を、パターンが所定の寸法以下の間隔で他のパターンと近接すると共に他のパターンに他の位相シフターが配置されない場合における位相シフターの幅よりも小さく設定する工

程とを含むことが好ましい。

このようにすると、他のパターンの遮光性が高くなるに従って、対象パターンにおける位相シフター幅を小さくするため、他のパターンの存在によって、対象パターンの裏側に回り込んでくる光（同位相の光）が減少する程度に応じて、対象パターンの内部（位相シフター）を透過する光（反対位相の光）を減少させることができる。従って、本発明のマスクデータ作成方法による前述の効果を確実に得ることができる。

本発明のマスクデータ作成方法において、他のパターンは、パターンの両側にそれぞれ近接する2つのパターンであり、位相シフターの幅を調整する工程は、位相シフターの幅として、少なくとも2つ以上の異なる幅を設定する工程と、パターンの両側に近接する各他のパターンのそれぞれからパターンまでの距離S1及びS2を求める工程と、 $(S1 + S2) / 2$ が所定の値以下となる場合における位相シフターの幅を、 $(S1 + S2) / 2$ が所定の値よりも大きくなる場合における位相シフターの幅よりも小さく設定する工程とを含んでいてもよい。この場合にも、本発明のマスクデータ作成方法による前述の効果を確実に得ることができる。

以上のように、本発明によると、孤立パターンのみではなく、パターン同士が互いに近接するような複雑なパターンが存在するフォトマスクにおいても、マスクエンハンサー構造を用いることによって、光強度分布のコントラストの強調効果やプロセスマージンの向上効果が十分に得られる。また、マスクエンハンサー構造における位相シフター幅を、各パターン間の近接関係や隣接パターンの遮光性に応じて最適化することができるので、ランダムなパターン配置の微細パターンの形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

図面の簡単な説明

図1(a)は本発明のマスクエンハンサーを用いたフォトマスクの平面図であ

り、図1（b）及び図1（c）はそれぞれ図1（a）におけるI—I線の断面図である。

図2は本発明のマスクエンハンサーを用いたフォトマスクの他例の平面図である。

図3（a）は本発明の第1の実施形態に係るフォトマスクの平面図であり、図3（b）は図3（a）におけるII-II線の断面図である。

図4は本発明の第1の実施形態に係るフォトマスクの他例の平面図である。

図5はマスクエンハンサー構造において半遮光部を用いた、本発明の第1の実施形態に係るフォトマスクの平面図である。

図6（a）は本発明のマスクエンハンサー構造を持つパターンの一例を示す図であり、図6（b）は、図6（a）に示すパターンにおけるパターン幅 L と位相シフター幅 F との種々の組み合わせに対する露光マージンをシミュレーションし、その結果をプロットした等高線グラフである。

図7（a）は本発明のマスクエンハンサー構造を持ち且つ密集パターンを構成するパターンの一例を示す図であり、図7（b）は、露光時にウェハ上における図7（a）の線分BB'に対応する位置に形成される光強度分布を示す図である。

図8（a）及び（b）は、図7（b）の光強度 I_c の位相シフター幅 F に対する依存性をシミュレーションした結果を示す図である。

図9は、図7（a）に示すマスクパターンを用いて、幅 70 nm のパターンの形成を行なう際の露光マージンをシミュレーションし、その結果に基づいて、パターン間の近接間隔 S を変化させた場合における露光マージンが最大となるときの位相シフターの幅 F_{opt} をプロットしたグラフである。

図10（a）は本発明のマスクエンハンサー構造を持ち、且つマスクエンハンサー構造を持つ他のパターンと共に密集パターンを構成するパターンの一例を示す図であり、図10（b）は、図10（a）に示すマスクパターンを用いて、幅

70 nmのパターンの形成を行なう際の露光マージンをシミュレーションし、その結果に基づいて、パターン間の近接間隔Sを変化させた場合における露光マージンが最大となるときの位相シフターの幅 F_{opt} をプロットしたグラフである。

図11は本発明の第1の実施形態の第1変形例に係るフォトマスクの平面図である。

図12は、マスクエンハンサー構造において半遮光部を用いた、本発明の第1の実施形態の第1変形例に係るフォトマスクの平面図である。

図13(a)～(d)は、本発明の第1の実施形態の第1変形例に係るフォトマスクにおける各パターンが不規則な間隔で並んだ密集パターンを、それと等価な、各パターンが等間隔に並んだ密集パターンに換算する方法を説明するための図である。

図14は、本発明の第1の実施形態の第2変形例に係るフォトマスクの平面図である。

図15(a)～(d)は本発明の第2の実施形態に係るパターン形成方法の各工程を示す断面図である。

図16(a)は通常露光用の光源を示す図であり、図16(b)は輪帯露光用の光源を示す図であり、図16(c)は四重極露光用の光源を示す図であり、図16(d)は輪帯-四重極混成型露光用の光源を示す図である。

図17は本発明の第3の実施形態に係るマスクデータ作成方法のフロー図である。

図18(a)～(f)は、本発明の第3の実施形態に係るマスクデータ作成方法の各工程における具体的なマスクパターン作成例を示す図である。

図19(a)～(e)は、本願発明者により見出されたマスクエンハンサー構造によるコントラスト強調効果を説明するための図である。

発明を実施するための最良の形態

前提事項

まず、本発明の各実施形態を説明するに当たっての前提事項について説明する。

通常、フォトマスクは縮小投影型の露光機で使用されるため、マスク上のパターン寸法を議論する場合には縮小倍率を考慮しなければならない。しかし、以下の各実施形態を説明する際には、混乱を避けるため、形成しようとする所望のパターン（例えばレジストパターン）と対応させてマスク上のパターン寸法を説明する場合、特に断らない限り縮小倍率により該寸法を換算した値を用いている。具体的には、M分の1縮小投影システムにおいて、幅 $M \times 100 \text{ nm}$ のマスクパターンによって幅 100 nm のレジストパターンを形成する場合にも、マスクパターン幅及びレジストパターン幅は共に 100 nm であると表記する。

また、本発明の各実施形態においては、特に断らない限り、M及びNAは露光機の縮小投影光学系の縮小倍率及び開口数をそれぞれ表し、λは露光光の波長を表すものとする。

また、パターン形成においては遮光領域にレジストパターンが形成されるポジレジストプロセスを仮定して説明する。ネガレジストプロセスにおいては、遮光領域のレジストが除去されるプロセスとなるので、ポジレジストプロセスにおけるレジストパターンをスペースパターンと読み替えればよい。

また、フォトマスクとしては透過型マスクを前提として説明する。反射型マスクにおいては、透過領域が反射領域となり、遮光領域が非反射領域となるので、透過現象を反射現象と読み替えればよい。具体的は、透光部及び透過性領域をそれぞれ反射部及び反射領域と読み替え、遮光部を非反射部と読み替えればよい。さらに、部分的に光を透過する領域は部分的に光を反射する領域と読み替えると共に、透過率は反射率と読み替える。

マスクエンハンサー

次に、本発明の各実施形態の説明において登場するマスクエンハンサーについて簡単に説明する（詳しくは前述の文献1等を参照）。

図1（a）はマスクエンハンサーを説明するための図（マスクエンハンサー構造を持つマスクパターンが設けられたフォトマスクの平面図）であり、図1（b）及び（c）は図1（a）におけるI—I線の断面図のバリエーションである。尚、図1（a）において、透過性基板100については斜視図的に表している。

図1（a）に示すように、透過性基板100の上には、露光によりウェハ上に所望のライン状のパターンを形成するためのマスクパターン（パターン111及び112）が描かれている。ここで、マスクパターンは、フォトマスクに対して露光を行なうことによってウェハ上におけるマスクパターンと対応する位置に遮光領域を形成するための遮光性パターンである。また、透過性基板100におけるマスクパターンが形成されていない部分が透光部（開口部）である。

尚、本願において、ライン状のパターンとは、露光波長（例えば露光光がArFエキシマレーザであれば193nm）の2倍以上の長さ（ウェハ上寸法）を有する矩形領域を意味するものとし、パターン全体としてライン状であるパターンに限定されるものではない。すなわち、前述のような矩形領域を含有する任意のパターンに対しては、当該矩形領域のみをライン状のパターンとして取り扱えばよい。ここで、ライン状のパターンからなる遮光パターンに対して露光を行なったときに形成される光強度分布を考えた場合、有限の長さを持つライン状のパターンの中央部付近の光強度分布が、無限の長さを持つライン状のパターンの光強度分布と同等になるためには、有限の長さを持つライン状のパターンは露光波長の2倍以上の長さを持つ必要がある。言い換えると、露光波長の2倍以上の長さを持つライン状のパターンは、無限の長さを持つライン状のパターンとして取り扱うことができる。

図2は、露光波長の2倍以上の長さを持つ矩形領域を含有するパターンの一例

を示している。尚、図2において、図1(a)に示すフォトマスクと同一の部材には同一の符号を付すことにより、説明を省略する。図2に示すように、透光部104(正確にはその一部分)を取り囲むような中抜きのパターン113において、露光波長の2倍以上の長さを有する矩形領域となる部分パターン113A(一对の透光部104によって挟まれた部分パターン)が存在すれば、当該部分パターン113Aをライン状のパターンと呼ぶものとする。

マスクパターンとなるパターン111及び112は、遮光部101のみから構成されているか又は遮光部101と位相シフター102との組み合わせから構成されている。遮光部101つまり遮光膜は、例えばCr等の、光を殆ど透過させない遮光性材料から構成されている。一方、位相シフター102は光を透過させるが、位相シフター102を透過する光と透光部を透過する光とは反対位相の関係(具体的には両者の位相差が $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下(但し n は整数)となる関係)にある。以下の説明においては、特に断らない限り、単に位相シフターと呼ぶ場合、その透過率は透光部と同等であるものとする。但し、位相シフター102の透過率は100%に限られるものではないが、位相シフター102は、最低でも20%以上、好ましくは50%以上の高い透過率を有することが好ましい。

図1(a)に示すように、パターン111及び112はそれぞれ透過性基板100上に孤立して存在するパターンである。ここで、孤立して存在するとは、露光において他のパターンの影響を受けないという意味であり、具体的には、光学的に干渉の影響が無視できる距離である $2 \times \lambda / NA$ の距離以内に他のパターンが存在しないこと、つまりは他のパターンが近接していないことを意味する。

尚、本願において、パターンが孤立しているかどうかは、着目するライン状の矩形領域のみを対象として定めるものとする。すなわち、あるパターンが他のパターンから完全に分離されていなくても孤立する場合がありうる。具体的には、例えば図2に示すパターン113において、ライン状の部分パターン113Aの

両側に、光学的に干渉の影響が無視できる寸法（つまり $2 \times \lambda / N.A.$ ）よりも大きい幅を有する透光部 104 が存在すれば、ライン状の部分パターン 113A は孤立しているものとみなす。

また、図 1 (a) に示すように、パターン 111 は、所定寸法 W0 に対して、 $W_w > W0$ となる線幅 W_w の部分パターン 111A と、 $W0 \geq L1$ となる線幅 $L1$ の部分パターン 111B とからなる。また、部分パターン 111B の中心部には、線幅 $F1$ の位相シフター 102 が設けられている。すなわち、パターン 111 は、その外形を持つ遮光部 101 の領域と、遮光部 101 内の開口部に設けられた位相シフター 102 の領域とを持つ。さらに、図 1 (b) に示すように、遮光部 101 は遮光膜から構成されており、位相シフター 102 は、透過性基板 100 における該遮光膜の開口部の下側を掘り込むことによって形成できる。これは、透光部と同等の透過率を有する位相シフターを実現するための最も好ましい構造である。このような透過率が十分に高い位相シフターにより、パターン形成特性の良否を表す指標、つまり露光マージンや焦点深度等を大きく向上させることが可能になる。但し、遮光部 101 の中心部に位相シフター 102 を配置するための断面構成は、図 1 (b) に示す構成に限定されるものではない。以下、特に断らない限り、マスクパターンとなる各パターンにおける最も外側の領域（最外領域）は遮光部から構成されているものとし、各パターンの線幅とは、最外領域の遮光部の一端と透光部との境界から、最外領域の遮光部の他端と透光部との境界までの幅、つまりパターン全体の幅で定義されるものとする。

ところで、一般に、回折現象によってマスクパターンを回り込む光を無視できなくなる寸法が $0.8 \times \lambda / N.A.$ 程度であることが経験的に知られている。よって、 $0.8 \times \lambda / N.A.$ 以上の幅を有するマスクパターンを遮光部のみで形成したとしても十分な遮光性が実現されるので、露光により形成される光強度分布において高いコントラストを得られる。しかし、 $0.8 \times \lambda / N.A.$ 以下の幅を有するマスクパターンを遮光部のみで形成した場合には、マスクパターンの外側の透光

部からマスクパターンの下側に回り込む回折光のために、十分な遮光性が得られなくなり、その結果、露光により形成される光強度分布におけるコントラストが低くなる。

このとき、透光部から回り込む回折光と反対位相の関係にある光がマスクパターンの中心部を透過するように設定できれば、これらの光が互いに干渉し合って、互いに打ち消し合うことになる。よって、 $0.8 \times \lambda / NA$ 以下の幅を有するマスクパターン（つまり遮光パターン）の中心部に位相シフターを設けることにより、その遮光性を向上させることができ、その結果、微細線幅のパターン形成においても高いコントラストを実現できるようになる。これが、マスクエンハンサーの原理であり、 $0.8 \times \lambda / NA$ 以下の幅を有する遮光パターンの中心部に位相シフターが設けられた構造をマスクエンハンサー構造と称する。但し、 $0.8 \times \lambda / NA$ を越える幅の遮光部として形成されたマスクパターンの中心部に位相シフターを設けると、逆にその遮光性は低下する。なぜなら、マスクパターン周辺から回り込んでくる回折光が殆ど存在しない状況において、該回折光と反対位相の関係にある光がマスクパターン内部を透過すると、結果的に反対位相の光が過剰となるからである。

また、遮光パターンの中心部に位相シフターを設けることにより遮光パターンの遮光性を向上させることができる寸法の上限は $0.8 \times \lambda / NA$ であるが、位相シフターを設けることにより遮光パターンの遮光性を顕著に向上させができる寸法は $0.6 \times \lambda / NA$ 以下の寸法である。

以上に説明したように、マスクエンハンサー構造によって微細パターン形成を可能とするフォトマスクを実現するためには、前述の所定寸法WOは $0.8 \times \lambda / NA$ 以下の必要があり、 $0.6 \times \lambda / NA$ 以下であることがより好ましい。また、遮光パターンを用いたパターン形成を行なうことが回折現象によって極めて困難になる寸法が $0.3 \times \lambda / NA$ であるので、所定寸法WOは $0.3 \times \lambda / NA$ 以上であることが好ましい。

また、図1(a)に示すように、パターン112は、 $W_0 \geq L_2$ となる線幅 L_2 の部分パターン112Aと、 $W_0 \geq L_3$ となる線幅 L_3 の部分パターン112Bとからなる。また、パターン111と同様に、パターン112も、その外形を持つ遮光部(遮光膜)101の領域と、遮光部101内の開口部に設けられた位相シフター102の領域とを持つ。また、部分パターン112Aの中心部には線幅 F_2 の位相シフター102Aが設けられていると共に、部分パターン112Bの中心部には線幅 F_3 の位相シフター102Bが設けられている。すなわち、部分パターン112A及び112Bは共にマスクエンハンサー構造を有している。ここで、部分パターン112A及び112Bのそれぞれのパターン幅 L_2 及び L_3 は、所定寸法 W_1 に対して、 $W_0 \geq L_2 > W_1 \geq L_3$ の関係にある。位相シフター102A及び102Bのそれぞれの線幅 F_2 及び F_3 は、 $F_3 > F_2$ の関係にある。

通常、回折現象によってマスクパターン周辺の透光部からマスクパターンの裏側に回り込む回折光は、マスクパターンの線幅が細くなる程増加する。よって、マスクエンハンサー構造においては、マスクパターンの線幅が細くなる程、回折現象によりマスクパターンの裏側に回り込む光を打ち消すための位相シフターの幅を太くすることが好ましい。このようにすると、異なる線幅の複数の部分パターンからなるマスクパターンにおいても全ての部分パターンによって高い遮光性が実現され、その結果、露光により形成される光強度分布におけるコントラストが高くなるフォトマスクを実現できる。ここで、同一のパターンにおける線幅の異なる複数の部分パターンを例として説明したが、同一の透過性基板上における互いに独立した異なる複数のパターン同士の間についても同様の構成(パターン線幅が細くなるに従って位相シフター幅を太くする構成)を用いることが好ましい。すなわち、図1(a)の構成において、パターン111における部分パターン111Bの線幅 L_1 と、パターン112における部分パターン112Bの線幅 L_3 との間で $W_0 \geq L_1 > W_1 \geq L_3$ の関係が成り立つ場合、部分パターン111B

の位相シフター 102 の線幅 F1 と、部分パターン 112B の位相シフター 102B の線幅 F3 との間で $F3 > F1$ となる。

尚、各パターンの線幅の差が、各パターン周辺から回り込む回折光の強度の差を無視できる程度に小さい場合、各パターンの中心部に設けられる位相シフターの幅を同じにしてもよい。すなわち、図 1 (a) の構成において、パターン 111 における部分パターン部 111B の線幅 L1 と、パターン 112 における部分パターン 112A の線幅 L2 との間で、 $W0 \geq L1 > W1$ 且つ $W0 \geq L2 > W1$ の関係が成り立つ場合、部分パターン 111B の位相シフター 102 の線幅 F1 と、部分パターン 112A の位相シフター 102A の線幅 F2 との間で $F2 = F1$ としてよい。

以上のように、孤立して存在するマスクパターンに対してマスクエンハンサー構造を適用することによって、全ての孤立マスクパターンによって高い遮光性を実現でき、それにより、コントラストの高い光強度分布を達成できるフォトマスクを実現できる。すなわち、微細パターン形成に優れたフォトマスクを実現できる。

尚、以上の説明においては、マスクエンハンサー構造が Cr 膜等の遮光膜と位相シフターとから構成されるものとして説明を行なってきたが、図 1 (c) に示すように、遮光膜よりなる遮光部 101 を、半遮光膜よりなる半遮光部 103 に置き換える同様の効果が得られる。図 1 (b) と図 1 (c) との違いは、まさに、遮光部 (遮光膜) 101 が半遮光部 (半遮光膜) 103 に置き換わっていることだけである。ここで、半遮光部 103 は、透光部を基準として露光光を同位相で且つ部分的に透過させる。すなわち、半遮光部 103 を透過する光と透光部を透過する光とは同位相の関係 (具体的には両者の位相差が $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下 (但し n は整数) となる関係) にある。但し、半遮光部 103 の透過率は 15% 以下であることが好ましい。このようにすれば、マスクパターンを透過した光が過剰となって、レジストを感光さ

せることを防止できる。このような半遮光部 103 となる半遮光膜としては、例えば厚さ 30 nm 以下の金属薄膜を用いることができる。金属薄膜としては、Cr (クロム)、Ta (タンタル)、Zr (ジルコニウム)、Mo (モリブデン) 若しくは Ti (チタン) 等の金属又はそれらの合金を薄膜化 (厚さ 30 nm 以下) したものを用いることができる。具体的な合金としては、Ta—Cr 合金、Zr—Si 合金、Mo—Si 合金又は Ti—Si 合金等がある。

また、前述のように遮光部 101 に代えて半遮光部 103 を用いると、0.8 × λ/NA を越える線幅のマスクパターンにマスクエンハンサー構造を適用することによっても、マスクパターンの遮光性を向上させることが可能となる。なぜなら、0.8 × λ/NA を越える線幅のマスクパターンにおいても、その内部を、透光部と同じ位相の光が透過するので、パターン内部に位相シフターを設けることに起因して反対位相の光が過剰になる事態を阻止できるからである。但し、0.8 × λ/NA 以下の線幅のマスクパターンにおいて半遮光部 103 を用いた場合の効果は、遮光部 101 を用いた場合の効果と全く同様である。

以下の各実施形態では、主として、マスクエンハンサー構造の適用対象となるマスクパターンに他のパターンが近接する場合における該マスクエンハンサー構造の構成について説明する。

第 1 の実施形態

以下、本発明の第 1 の実施形態に係るフォトマスクについて図面を参照しながら説明する。

図 3 (a) は第 1 の実施形態に係るフォトマスクの平面図であり、図 3 (b) は図 3 (a) における II-II 線の断面図である。尚、図 3 (a) において、透過性基板 100 については斜視図的に表している。

図 3 (a) に示すように、透過性基板 100 の上には、露光によりウェハ上に所望のライン状のパターンを形成するためのマスクパターン (ラインパターン 1

21～123) が描かれている。ここで、各ラインパターン121～123は基本的に遮光部101から構成されている。また、所定寸法W0に対して、各ラインパターン121～123における線幅がW0以下となるパターン領域の中心部では、遮光部101が開口されており、該開口領域に位相シフター102が設けられている。すなわち、各ラインパターン121～123はマスクエンハンサー構造を持つ。例えばパターン121は、 $W0 \geq W2 > W3$ の関係を満たす所定寸法W2及びW3に対して、 $W2 \geq L4 > W3$ の関係を満たす線幅L4のパターンであり、そのパターン121の中心部に位相シフター102が設けられている。

また、図3(a)に示すように、パターン121は、そのライン方向に対して垂直な方向において透光部を挟んで所定寸法S0以下の距離で他のパターン122及び123と近接する部分パターン121Aと、前記の垂直な方向において所定寸法S0以下の距離では他のパターンと近接しない(つまり孤立した)部分パターン121Bとからなる。尚、ここで、部分パターン121Aと、それを挟む他のパターン122及び123とは密集パターン151を構成している。また、部分パターン121Aの中心部には、線幅F4Aの位相シフター102Aが設けられていると共に、部分パターン121Bの中心部には、線幅F4Bの位相シフター102Bが設けられている。すなわち、部分パターン121A及び121Bはマスクエンハンサー構造を持つ。ここで、密集パターン151を構成する部分パターン121Aの位相シフター102Aは、孤立した部分パターン121Bの位相シフター102Bよりも細い。すなわち、 $F4B > F4A$ である。

尚、以上の密集パターンの説明においては、着目するライン状のパターンと近接する他のパターンは、当該着目するライン状のパターンから分離された別のパターンであるとしてきた。しかし、密集パターンは必ずしも互いに分離された異なるパターンのみから構成されていなくてもよい。具体的には、例えば同一のパターンに属する複数のライン状の矩形領域が互いに透光部を挟んで並んでいるならば、当該複数のライン状の矩形領域のみに着目して、これらをライン状の密集

パターンと呼ぶことができる場合がある。図4は、そのような複数のライン状の矩形領域を有するパターンの一例を示している。尚、図4において、図3(a)に示すフォトマスクと同一の部材には同一の符号を付すことにより、説明を省略する。図4に示すように、複数のライン状の矩形領域を有するパターン120において、所定の寸法S0以下の幅を持つ透光部を挟んで互いに近接する複数のライン状の矩形領域は密集パターン120Cを構成する。すなわち、密集パターン120Cを構成する複数の矩形領域のうちそれらの中心部に位置する矩形領域である部分パターン120Aに設けられた位相シフター102の寸法F4Aは、孤立した矩形領域である部分パターン120Bに設けられた位相シフター102の寸法F4Bよりも小さい。また、部分パターン120Aの両隣の矩形領域に設けられた位相シフター102の寸法はF4Aよりも大きく且つF4B以下である。また、前述の透光部（複数のライン状の矩形領域に挟まれる透光部）は、例えば図2に示す中抜きのパターン113内の透光部のような、遮光部101に取り囲まれた透光部であってもよい。

また、図3(b)に示すように、遮光部101は遮光膜から構成されており、位相シフター102は、透過性基板100における該遮光膜の開口部の下側を掘り込むことによって形成できる。

第1の実施形態によると、所定の寸法以下の距離で他のパターン122及び123と近接する部分パターン121Aのマスクエンハンサー構造において、位相シフター102（位相シフター102A）の幅を相対的に小さくする。このため、近接する他のパターン122及び123の存在によって、部分パターン121Aの周辺の透光部から部分パターン121Aの裏側に回り込んでくる光（透光部と同位相の光）が減少する程度に応じて、部分パターン121Aの内部（位相シフター102A）を透過する光（透光部と反対位相の光）を減少させることができる。従って、部分パターン121Aの遮光性を十分に向上させることができるために、露光マージンが向上すると共に、露光により形成される光強度分布のコン

トラストが向上する。すなわち、孤立パターンのみではなく、パターン同士が互いに近接するような複雑なパターンが存在するフォトマスクにおいても、マスクエンハンサー構造によりプロセスマージンの向上効果が十分に得られる。また、マスクエンハンサー構造における位相シフター幅を各パターン間の近接関係に応じて最適化することができるので、ランダムなパターン配置の微細パターンの形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

また、第1の実施形態によると、任意の間隔で複数のパターンが配置された密集パターンにおけるマスクエンハンサー構造のパターンについても、露光マージンを最大化できるフォトマスクの実現が可能となる。従って、微細なマスクパターンにおけるマスクエンハンサー構造による優れたパターン形成特性が、マスクパターンとなる各パターンが任意の近接関係を持つ場合にも発揮されるので、微細ノパターン形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

尚、本実施形態において、図3(a)に示すように、マスクエンハンサー構造を持つパターン121に近接するパターン122及び123も、マスクエンハンサー構造をパターンとして表している。しかし、部分パターン121Aと共に密集パターン151を構成するパターン122及び123はマスクエンハンサー構造のパターンに限られるものではなく、遮光部のみから形成されたパターンであってもよい。

また、本実施形態において、マスクエンハンサー構造は、遮光部と位相シフターとから構成される構造として説明してきたが、前記の遮光部を半遮光部と置き換えるてもよい。すなわち、図5に示すように、各パターン121～123のマスクエンハンサー構造が、位相シフター102と半遮光部103とから構成されていてもよい。図5において明らかなように、図3(a)に示す遮光部101が半遮光部103に置き換えられている。

また、本実施形態において、パターン121を構成する部分パターン121A及び部分パターン121Bの線幅を共にL4とした。しかし、部分パターン12

1 A及び1 2 1 Bのそれぞれの線幅は、W3よりも大きく且つW2以下の範囲内のパターン幅であれば互いに異なっていてもよい。すなわち、部分パターン1 2 1 Aの線幅をL 4 Aとし、部分パターン1 2 1 Bの線幅をL 4 Bとすると、W2 \geq L 4 A > W3 且つW2 \geq L 4 B > W3 である限り、L 4 A \neq L 4 Bであってもよい。また、所定寸法W2及びW3は、(W2-W3) \leq 0. 2 \times λ / NAの関係を満たすことが好ましい。すなわち、部分パターン1 2 1 Aの線幅L 4 Aと、部分パターン1 2 1 Bの線幅L 4 Bとの差は(0. 2 \times λ / NA) \times M以下であることが好ましい。

また、本実施形態において、密集パターン1 5 1を形成する部分パターン1 2 1 Aと、孤立パターンである（ライン方向に対して垂直な方向において）部分パターン部1 2 1 Bとが、1つの連続パターンであるパターン1 2 1を構成する場合を例として説明した。しかし、前述の各線幅についての関係を満足する限りにおいて、密集パターンを構成するパターンと、孤立パターンとが、同一の透過性基板上における互いに異なるパターンであってもよい。

また、本実施形態において、前記のW0は0. 8 \times λ / NA以下であることが好ましく、0. 3 \times λ / NA以上で且つ0. 6 \times λ / NA以下であることがより好ましい。

また、本実施形態において、前記のS0は λ / NA以下であることが好ましい。

以下、前述の本実施形態のフォトマスクが、マスクエンハンサー構造によって孤立パターン領域のみだけではなく密集パターン領域においても微細パターン形成特性に優れたフォトマスクとなることを、シミュレーション結果に基づいて詳しく説明する。

まず、マスクエンハンサー構造において、同一の位相シフター幅に対して十分なコントラストが得られるマスクパターン線幅の許容範囲について説明する。すなわち、本実施形態における所定寸法W2と所定寸法W3との差(W2-W3)

は $0.2 \times \lambda / NA$ 以下であることが好ましいということである。以下、この内容について図面を参照しながら説明する。

図 6 (a) は、マスクエンハンサー構造を持つパターンの一例を表す図である。図 6 (a) に示すパターンは、線幅 F の位相シフター 102 が遮光部 101 により囲まれてなる、パターン幅 L のラインパターンである。本願発明者は、 L と F との種々の組み合わせにおいて図 6 (a) に示すマスクパターンを用いて、幅 70 nm のラインパターン (レジストパターン) 形成の光学シミュレーションを行なった。シミュレーションにおいては、露光波長 $\lambda = 193 nm$ 、開口数 $NA = 0.75$ に設定すると共に、照明条件として、干渉度における外径及び内径がそれぞれ 0.8 及び 0.6 となる 3/4 輪帯照明を用いた。

図 6 (b) は、前記のシミュレーションによって、図 6 (a) に示すパターンにおける L と F との種々の組み合わせに対する露光マージンをプロットした等高線グラフである。図 6 (b) に示す等高線グラフでは、 L と F との組み合わせにおける最大露光マージン E_{max} に対しての、 L と F の各組み合わせにおける露光マージン $E(L, F)$ の比率を表している。すなわち、 $E(L, F) / E_{max}$ の等高線グラフを表している。ここで、縦軸は F であり、横軸は $(L - F)$ を λ / NA で規格化した値で示してある。尚、露光マージンとは、パターン寸法を 10% 变化させるために必要な露光量変化の割合 (単位 : %) を意味する。すなわち、露光マージンが大きいほど、露光量変化に対してパターン寸法が安定するので、実際のパターン形成工程における露光量変動に対してパターン寸法が変動しにくくなるという好ましい状況になる。

図 6 (b) に示す等高線グラフから、例えば $F = 60 nm$ の場合、 $(L - F)$ が $0.1 \times \lambda / NA$ から $0.3 \times \lambda / NA$ までの範囲において、最大露光マージンの 90% 以上の露光マージンが実現されていることが分かる。すなわち、最大露光マージンの 90% の露光マージンを実現できる範囲を、十分な露光マージンが得られる範囲とするなら、 $F = 60 nm$ の位相シフターに対して十分な露光マ

ージンが得られるパターン幅 L の許容範囲は、 $F + 0.1 \times \lambda / NA$ から $F + 0.3 \times \lambda / NA$ までとなる。

また、図 6 (b) のグラフから、 $F = 40 \sim 80 \text{ nm}$ のどの値においても、十分な露光マージンが得られるパターン幅 L には $0.2 \times \lambda / NA$ 程度のレンジがあることも分かる。言い換えると、パターン幅 L の差が $0.2 \times \lambda / NA$ 以下である各パターンに対して、同じ線幅 F の位相シフターを設けたとしても、十分な露光マージンが得られるということである。

次に、密集パターンを構成する、マスクエンハンサー構造を持つパターンの中心付近に配置される位相シフターの幅を、孤立パターンとなる、マスクエンハンサー構造を持つパターンの中心付近に配置される位相シフターの幅よりも細くすることのメリットについて図面を参照しながら説明する。

図 7 (a) は、マスクエンハンサー構造を持つパターンが密集パターンを構成している様子を示す図である。図 7 (a) に示すように、マスクエンハンサー構造を有する線幅 L のライン状パターン 310 の両側に、間隔 S (透光部領域) を置いて、遮光部からなる線幅 L_w のライン状パターン 311 及び 312 が近接して配置されている。ライン状パターン 310 のマスクエンハンサー構造は、線幅が F の位相シフター 310B を遮光部 310A によって囲むことにより構成されている。

図 7 (b) は、露光時にウェハ上における図 7 (a) の線分 BB' と対応する位置に形成される光強度分布を示す図である。図 7 (b) において、線幅 L のパターン 310 の中心と対応する光強度を I_c (間隔 S によって変化する) とすると、この値が小さいほどパターン 310 の遮光性が高いことを意味する。逆に、この値が大きいと、パターン 310 によって十分に光を遮光できていないことを意味する。尚、本明細書においては、特に断らない限り、光強度を露光光の光強度を 1 としたときの相対光強度で表す。

図 8 (a) 及び (b) は、前記の I_c の位相シフター幅 F に対する依存性をシ

ミュレーションした結果を示している。シミュレーションにおいては、露光波長 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 、開口数 $NA = 0.75$ に設定すると共に、照明条件として、干渉度における外径及び内径がそれぞれ 0.8 及び 0.6 となる $3/4$ 輪帯照明を用いた。また、シミュレーションにおいては、幅 $L = 100 \text{ nm}$ 、幅 $L_w = 300 \text{ nm}$ に設定した。すなわち、単純な遮光パターンでは十分に光を遮光できない $L = 100 \text{ nm}$ ($L = 100 \text{ nm}$ は $0.8 \times \lambda / NA \approx 206 \text{ nm}$ よりも小さい) のパターン 310 はマスクエンハンサー構造を持ち、単純な遮光パターンでも十分に光を遮光できる $L_w = 300 \text{ nm}$ のパターン 311 及び 312 は遮光部のみから構成されている。

図 8 (a) は、 S が実質的に無限大である場合、つまり、マスクエンハンサー構造のパターン 310 が孤立して存在する場合における、光強度 I_c の位相シフター幅 F に対する依存性をシミュレーションした結果を表すグラフである。また、図 8 (b) は、 $S = 100 \text{ nm}$ である場合、つまり、マスクエンハンサー構造のパターン 310 の近傍に他の遮光パターン (パターン 311 及び 312) が近接する場合における、光強度 I_c の位相シフター幅 F に対する依存性をシミュレーションした結果を表すグラフである。

図 8 (a) のグラフでは、 $F = 65 \text{ nm}$ において光強度 I_c が最小値となっている。すなわち、マスクエンハンサー構造を持つ孤立パターンにおいて遮光性が最大となるのは位相シフター幅 F が 65 nm のときであることが分かる。一方、図 8 (b) のグラフでは、 $F = 40 \text{ nm}$ において光強度 I_c が最小値となっている。すなわち、他の遮光パターンが近傍に存在する、マスクエンハンサー構造を持つパターンにおいて遮光性が最大となるのが $F = 40 \text{ nm}$ のときであることが分かる。

以上のように、マスクエンハンサー構造を持つ同じ線幅 ($L = 100 \text{ nm}$) のパターンにおいても、そのパターンが孤立したパターンであるか又は密集パターンを構成しているかに応じて、遮光性が最大となる位相シフター幅、つまり露光

マージンが最大となる位相シフター幅は異なる。具体的には、密集パターンを構成するパターンにおける露光マージンが最大となる位相シフター幅 40 nm は、孤立したパターンにおける露光マージンが最大となる位相シフター幅 65 nm よりも細くなる。以下、この理由について説明する。

マスク エンハンサー構造においては、パターン周辺からパターンの裏側に回り込んでくる回折光を、パターン内部を透過する反対位相の光によって打ち消すことにより遮光性を向上させている。そのため、パターン周辺から回り込んでくる光が増加する程、パターン内部を透過する反対位相の光を増加させることが好ましい。しかし、パターン周辺から回り込んでくる光が減少すれば、パターン内部を透過する反対位相の光も減少させることが好ましい。なぜならば、もし、マスクパターン内部を透過する反対位相の光が過剰になると、マスクパターンの遮光性は劣化し、その結果、パターン形成に好ましくない状態となるからである。

ところで、微細な遮光パターンが孤立して存在する場合、パターンの線幅が細いことに加え、パターン周辺には十分に広い透光領域が存在することになる。よって、多くの回折光がパターンの裏側に回りこむことになる。そのため、その回折光を十分に打ち消すためには、幅の広い位相シフターを設けたマスクエンハンサー構造が好ましい。

一方、同じ微細な遮光パターンでも、その近傍に他の遮光パターンが存在し、それによりパターン周辺の透光領域の面積が減少すると、パターンの裏側に回りこむ回折光は孤立パターンの場合と比べて減少する。よって、そのような状況では、孤立パターンのときよりも幅の細い位相シフターを設けたマスクエンハンサー構造が好ましいものとなる。

一般に、遮光性と露光マージンやコントラスト等との間には相関性があるため、マスク エンハンサー構造を持つ同じ線幅のパターンにおいて、該パターンが他のパターンと密集パターンを構成する場合には該パターンに細い位相シフターを設ける一方、該パターンが孤立して存在する場合には該パターンに太い位相シフ

ターを設けることが好ましい。これにより、優れたパターン形成特性が得られる。以下、この効果をシミュレーションによって直接確認した結果について説明する。ここで、パターン形成特性の優劣を露光マージンによって評価している。

まず、本願発明者は、図7 (a) に示すマスクパターンを用いて、幅70 nmのパターンの形成を行なう際の露光マージンをシミュレーションにより求めた。シミュレーションにおいては、露光波長 $\lambda = 193 \text{ nm}$ 、開口数 $NA = 0.75$ に設定すると共に、照明条件として、干渉度における外径及び内径が0.8及び0.6となる3/4輪帯照明を用いた。また、図7 (a) におけるパターン310の幅 L を100 nmとし、パターン310に近接する遮光パターン311及び312の幅 L_w を300 nmとした。

図9は、前述の条件において、パターン間の近接間隔 S を変化させた場合における、露光マージンが最大となるときの位相シフターの幅 F_{opt} をプロットしたグラフである。尚、図9において、間隔 S を λ/NA により規格化した寸法で示している。

図9から分かるように、間隔 S が λ/NA 以下になると（規格化された S が1以下になると）、露光マージンが最大となるときの位相シフターの幅 F_{opt} が減少する。特に、間隔 S が $0.5 \times \lambda/NA$ 以下になると、最適な位相シフター幅 F_{opt} は、間隔 S が λ/NA を越える場合（パターン310が実質的に孤立している場合）と比べて半分程度まで下がってしまう。よって、良好な露光マージンを実現するためには、 λ/NA 以下となる間隔 S で密集パターンを構成する、マスクエンハンサー構造を持つパターンの中心部に設けられた位相シフターを、孤立パターンに設けられた位相シフターよりも細くすることが好ましいことが分かる。また、この好ましい構成の本質は、密集パターン領域におけるマスクパターン線幅に対する位相シフター幅の割合を相対的に減少させることである。

ところで、一般に近接効果と呼ばれる現象により、ウェハ上に形成される所望のパターンの幅が同じであっても、マスクパターンの線幅はそのパターンに近接

する他のパターンとの距離に応じて変えなければならないことがある。このように、ウェハ上に形成される所望のパターンの幅が同じであるのに、密集パターン領域と孤立パターン領域との間でマスクパターンの線幅が異なる場合、密集パターン領域におけるマスクパターン幅に対する位相シフター幅の割合を相対的に減少させるという構成を採用することが適切である。

すなわち、密集パターン領域におけるマスクエンハンサー構造のパターンの線幅 L_d とその中央付近に設けられた位相シフターの幅 F_d との比 F_d / L_d が、孤立パターン領域におけるマスクエンハンサー構造のパターンの線幅 L_i とその中央付近に設けられた位相シフターの幅 F_i との比 F_i / L_i よりも小さいことが好ましい。

また、図9のグラフを詳細に見ると、間隔 S が λ / NA 以下の場合、間隔 S の減少の度合いに比例して、露光マージンが最大となる位相シフター幅 F_{opt} も減少していることが分かる。尚、この結果より得られる、密集パターンを構成するマスクエンハンサー構造のパターンにおける好ましい構成については、後記の第1変形例で詳しく説明する。

尚、図9に示す、露光マージンを最大とする位相シフター幅 F_{opt} の算出においては、マスクエンハンサー構造のパターン（図7（a）のパターン310）に近接する他のパターン（図7（a）のパターン311及び312）を、遮光部のみからなる単純な遮光パターンとして F_{opt} の算出を行なったが、近接する他のパターンがマスクエンハンサー構造を持つ場合における F_{opt} の算出結果を以下に示す。

図10（a）は、マスクエンハンサー構造を持つパターンが、マスクエンハンサー構造を持つ他のパターンと共に密集パターンを構成している様子を示す図である。図10（a）に示すように、マスクエンハンサー構造を有する線幅 L のライン状パターン320の両側に、間隔 S （透光部領域）を置いて、マスクエンハンサー構造を有する線幅 L のライン状パターン321及び322が近接して配置

されている。ここで、パターン320～322のマスクエンハンサー構造はそれぞれ、線幅がFの位相シフター320B～322Bを遮光部320A～320Aによって囲むことにより構成されている。

本願発明者は、図10(a)に示すマスクパターンを用いて、幅70nmのパターンの形成を行なう際の露光マージンをシミュレーションにより求めた。シミュレーションにおいては、露光波長 $\lambda = 193\text{ nm}$ 、開口数NA=0.75に設定すると共に、照明条件として、干渉度における外径及び内径が0.8及び0.6となる3/4輪帯照明を用いた。また、図10(a)におけるパターン320～322の幅Lを100nmとした。

図10(b)は、前述の条件において、パターン間の近接間隔Sを変化させた場合における、露光マージンが最大となるときの位相シフターの幅F_{opt}をプロットしたグラフである。尚、図10(b)において、間隔Sを λ/NA により規格化した寸法で示している。

図10(b)のグラフから分かるように、図10(a)に示すマスクパターンを用いた場合にも、図9とほぼ同様の結果が得られた。すなわち、間隔Sが λ/NA 以下になると、露光マージンが最大となるときの位相シフターの幅F_{opt}が減少する。但し、図10(b)のグラフが図9のグラフと僅かに異なっている点は、同じ間隔Sにおいて、露光マージンが最大となるときの位相シフターの幅F_{opt}が5nm程度小さいことである。これは、近接する他のパターン321及び322における位相シフター321B及び322Bを透過する反対位相の光の影響によって、反対位相の光が全体として過剰になってしまったことに起因する。よって、マスクエンハンサー構造における位相シフター幅の決定においては、同じ間隔でパターン同士が密集する場合でも、対象とするパターンに近接する他のパターンがマスクエンハンサー構造を持つのか又は単純な遮光パターンであるのかを区別することが好ましい（この好ましい構成については、後記の第2変形例で詳しく説明する）。

第1の実施形態の第1変形例

以下、本発明の第1の実施形態の第1変形例に係るフォトマスクについて図面を参照しながら説明する。

図11は第1の実施形態の第1変形例に係るフォトマスク、具体的には、密集パターンを構成するマスクエンハンサー構造のマスクパターンが設けられたフォトマスクの平面図である。尚、図11において、透過性基板100については斜視図的に表している。

図11に示すように、透過性基板100の上には、露光によりウェハ上に所望のライン状のパターンを形成するためのマスクパターン（ラインパターン124～128）が描かれている。ここで、各ラインパターン124～128は基本的に遮光部101から構成されている。また、所定寸法W0に対して、各ラインパターン124～128における線幅がW0以下となるパターン領域の中心部には位相シフター102が設けられている。すなわち、各ラインパターン124～128はマスクエンハンサー構造を持つ。例えばパターン124は、 $W0 \geq W2 > W3$ の関係を満たす所定寸法W2及びW3に対して、 $W2 \geq L5 > W3$ の関係を満たす線幅L5のパターンであって、そのパターン124の中心部に位相シフター102が設けられている。

また、図11に示すように、パターン124は、そのライン方向に対して垂直な方向において透光部を挟んで間隔G1（S0>G1）で他のパターン125及び126と近接する部分パターン124Aを持つ。部分パターン124Aと、それを挟む他のパターン125及び126とは密集パターン152を構成している。また、部分パターン124Aの中心部には、線幅F5Aの位相シフター102Aが設けられている。

また、パターン124は、前記の垂直な方向において透光部を挟んで間隔G2（S0>G2>G1）で他のパターン127及び128と近接する部分パターン

124Bを持つ。部分パターン124Bと、それを挟む他のパターン127及び128とは密集パターン153を構成している。また、部分パターン124Bの中心部には、線幅F5Bの位相シフター102Bが設けられている。

本変形例の特徴は、F5B>F5Aとなる構成を持つことである。すなわち、密集パターンを構成するマスクエンハンサー構造のパターンにおいて、密集度の高い密集パターンを構成するパターンの中心部における位相シフター幅は、密集度の低い密集パターンを構成するパターンの中心部における位相シフター幅よりも細い。

また、マスクエンハンサー構造の位相シフター幅は、それが属する密集パターンの密集度に比例して細くすることが好ましい。すなわち、図11に示すマスク構成では、(F5B-F5A)が(G2-G1)に比例することが好ましい。

尚、以上の説明においては、個々のライン状のパターンが互いに分離された別々のパターンであるとしてきた。しかし、本変形例においても、第1の実施形態と同様に、複雑な多角形図形パターンに属する複数のライン状の矩形領域を対象とする場合には、個々のライン状の矩形領域のみについて上記の関係が満たされてもよい。また、ライン状の矩形領域同士の間の透光部は、例えば図2に示す中抜きのパターン113内の透光部のような、遮光部101に取り囲まれた透光部であってもよい。

本変形例によると、近接する他のパターンとの間の距離が小さくなるに従って、マスクエンハンサー構造を有するパターン(パターン124)における位相シフター幅を小さくする。このため、他のパターンの存在によって、パターン124の周辺の透光部からパターンの裏124側に回り込んでくる光(透光部と同位相の光)が減少する程度に応じて、パターン124の内部(位相シフター102)を透過する光(透光部と反対位相の光)を減少させることができる。従って、パターン124の遮光性を十分に向上させることができるために、露光マージンが向上すると共に、露光により形成される光強度分布のコントラストが向上する。

すなわち、孤立パターンのみではなく、パターン同士が互いに近接するような複雑なパターンが存在するフォトマスクにおいても、マスクエンハンサー構造によりプロセスマージンの向上効果が十分に得られる。また、マスクエンハンサー構造における位相シフター幅を各パターン間の近接関係に応じて最適化することができるので、ランダムなパターン配置の微細パターンの形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

また、本変形例によると、任意の間隔で複数のパターンが配置された密集パターンにおけるマスクエンハンサー構造のパターンについても、露光マージンを最大化できるフォトマスクの実現が可能となる。従って、微細なマスクパターンにおけるマスクエンハンサー構造による優れたパターン形成特性が、マスクパターンとなる各パターンが任意の近接関係を持つ場合にも発揮されるので、微細パターン形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

尚、本変形例において、図11に示すように、マスクエンハンサー構造を持つパターン124に近接するパターン125～128も、マスクエンハンサー構造をパターンとして表している。しかし、パターン125～128はマスクエンハンサー構造のパターンに限られるものではなく、遮光部のみから形成されたパターンであってもよい。

また、本変形例において、マスクエンハンサー構造は、遮光部と位相シフターとから構成される構造として説明してきたが、前記の遮光部を半遮光部と置き換えてよい。すなわち、図12に示すように、各パターン124～128のマスクエンハンサー構造が、位相シフター102と半遮光部103とから構成されていてもよい。図12において明らかなように、図11に示す遮光部101が半遮光部103に置き換えられている。

また、本変形例において、パターン124を構成する部分パターン124A及び部分パターン124Bの線幅を共にL5とした。しかし、部分パターン124A及び124Bのそれぞれの線幅は、W3よりも大きく且つW2以下の範囲内の

パターン幅であれば互いに異なっていてもよい。すなわち、部分パターン124Aの線幅をL5Aとし、部分パターン124Bの線幅をL5Bとすると、W2 \geq L5A > W3 且つ W2 \geq L5B > W3 である限り、L5A \neq L5B であってもよい。また、前記の所定寸法W2及びW3は、第1の実施形態と同様に、(W2 - W3) \leq 0. 2 \times λ / NAの関係を満たすことが好ましい。すなわち、部分パターン124Aの線幅L5Aと、部分パターン124Bの線幅L5Bとの差は(0. 2 \times λ / NA) \times M以下であることが好ましい。ここで、ウェハ上に形成される所望のパターンの幅が同じであるのに、高密集度の密集パターン領域と低密集度の密集パターン領域との間でマスクパターンの線幅が異なる場合、具体的には、部分パターン124Aの線幅L5Aと、部分パターン124Bの線幅L5Bとが異なる場合、次の様な構成を採用することが好ましい。すなわち、高密集度の密集パターン領域のマスクパターン線幅L5Aと該パターンの中央付近に設けられた位相シフター（位相シフター102A）の幅F5Aとの比F5A / L5Aが、低密集度の密集パターン領域のマスクパターン線幅L5Bと該パターンの中央付近に設けられた位相シフター（位相シフター102B）の幅F5Bとの比F5B / L5Bよりも小さい構成である。

また、本変形例において、密集度の高い密集パターン152を構成する部分パターン124Aと、密集度の低い密集パターン152を構成する部分パターン部124Bとが、1つの連続パターンであるパターン124を構成する場合を例として説明した。しかし、前述の各線幅についての関係を満足する限りにおいて、密集度の高い密集パターンを構成するパターンと、密集度の低い密集パターンを構成するパターンとが、同一の透過性基板上における互いに異なるパターンであってもよい。

また、本変形例において、第1の実施形態と同様に、前記のW0は0. 8 \times λ / NA以下であることが好ましく、0. 3 \times λ / NA以上で且つ0. 6 \times λ / NA以下であることがより好ましい。

また、本変形例において、第1の実施形態と同様に、前記のS0はλ/NA以下であることが好ましい。

ところで、本変形例の構成において、G2>S0で且つS0>G1であるとすると、間隔がS0以上の密集パターンにおける位相シフター幅については孤立パターンの場合と同じ値に設定すればよいので、(F5B-F5A)が(S0-G1)に比例するようにマスク構成を設定すればよい。

尚、本変形例では、密集パターンにおいて各パターンが等間隔に並んでいる場合を例として説明してきたが、各パターンが不規則な間隔で並んだ密集パターンについても本変形例の構成を適用することができる。

図13 (a) ~ (d) は、各パターンが不規則な間隔で並んだ密集パターンを、それと等価な、各パターンが等間隔に並んだ密集パターンに換算する方法を説明するための図である。

まず、図13 (a) に示す密集パターン161においては、着目するパターン331と、その両側に近接する他のパターン332及び333との間隔がそれぞれg1及びg2であるとする。このとき、g1及びg2が共にS0以下の値であれば、密集パターン161は、図13 (b) に示す密集パターン162と等価であると考えればよい。すなわち、密集パターン162においては、着目するパターン341と、その両側に近接する他のパターン342及び343との間隔が、 $g0 = (g1 + g2) / 2$ の等間隔である。密集パターン161と密集パターン162とが等価であると考えることができる理由は次の通りである。それは、本変形例のマスク構成は回折現象を考慮したものであるところ、周期配置のピッチに依存する物理現象には相加平均の法則が成り立つからである。尚、密集パターン161を構成する各パターン331~333、及び密集パターン162を構成する各パターン341~343は、いずれもライン状の遮光部101の中心部に位相シフター102が配置されてなるマスクエンハンサー構造を持つ。

次に、図13 (c) に示す密集パターン163においては、着目するパターン

351と、その両側に近接する他のパターン352及び353との間隔がそれぞれ g_3 及び g_4 であるとする。このとき、 $g_4 > S_0$ で且つ $S_0 > g_3$ であれば、密集パターン163は、図13(d)に示す密集パターン164と等価であると考えればよい。すなわち、密集パターン164においては、着目するパターン361と、その両側に近接する他のパターン362及び363との間隔がそれぞれ g_3 及び S_0 である。密集パターン163と密集パターン164とが等価であると考えることができる理由は次の通りである。それは、パターン同士の間隔が S_0 よりも大きくなれば、パターン同士の間隔が S_0 である場合と光学的に等価となるので、位相シフター幅を決定するための計算において、 S_0 よりも大きなパターン同士の間隔を直接考慮する必要はないからである。さらに、図13(d)に示す密集パターン164については、図13(a)に示す密集パターン161から図13(b)に示す密集パターン162への変換と同様に、各パターンが等間隔（具体的には $(g_3 + S_0) / 2$ の間隔）で並んだ密集パターンに変換することが可能である。尚、密集パターン163を構成する各パターン351～353、及び密集パターン164を構成する各パターン361～363は、いずれもライン状の遮光部101の中心部に位相シフター102が配置されてなるマスクエンハンサー構造を持つ。

第1の実施形態の第2変形例

以下、本発明の第1の実施形態の第2変形例に係るフォトマスクについて図面を参照しながら説明する。

図14は第1の実施形態の第2変形例に係るフォトマスク、具体的には、密集パターンを構成するマスクエンハンサー構造のマスクパターンが設けられたフォトマスクの平面図である。尚、図14において、透過性基板100については斜視図的に表している。

図14に示すように、透過性基板100の上には、露光によりウェハ上に所望

のライン状のパターンを形成するためのマスクパターン（ラインパターン131～135）が描かれている。ここで、各ラインパターン131～135は基本的に遮光部101から構成されている。また、所定寸法W0に対して、各ラインパターン131～133における線幅がW0以下となるパターン領域の中心部には位相シフター102が設けられている。すなわち、各ラインパターン131～133はマスクエンハンサー構造を持つ。例えばパターン131は、 $W0 \geq W2 > W3$ の関係を満たす所定寸法W2及びW3に対して、 $W2 \geq L6 > W3$ の関係を満たす線幅L6のパターンであって、そのパターン131の中心部に位相シフター102が設けられている。

また、図14に示すように、パターン131は、そのライン方向に対して垂直な方向において透光部を挟んで間隔G（S0>G）で他のパターン132及び133（マスクエンハンサー構造を持つ）と近接する部分パターン（マスクエンハンサー近接部）131Aを持つ。また、部分パターン131Aの中心部には、線幅F6Aの位相シフター102Aが設けられている。

また、パターン124は、前記の垂直な方向において透光部を挟んで間隔G（S0>G）で他のパターン134及び135（遮光部101のみから構成される）と近接する部分パターン（遮光パターン近接部）131Bを持つ。すなわち、部分パターン131A及び131Bから構成されるパターン131は、他のパターン132～135のそれぞれと全て等距離で近接している。また、部分パターン131Bの中心部には、線幅F6Bの位相シフター102Bが設けられている。

本変形例の特徴は、 $F5B > F5A$ となる構成を持つことである。すなわち、マスクエンハンサー構造のパターン同士が密集パターンを構成している場合におけるパターン内部の位相シフター幅は、マスクエンハンサー構造のパターンが単純な遮光パターンと共に密集パターンを構成している場合におけるパターン内部の位相シフター幅よりも細い。

尚、以上の説明においては、個々のライン状のパターンが互いに分離された別々のパターンであるとしてきた。しかし、本変形例においても、第1の実施形態の第1変形例と同様に、複雑な多角形图形パターンに属する複数のライン状の矩形領域を対象とする場合には、個々のライン状の矩形領域のみについて上記の関係が満たされればよい。また、ライン状の矩形領域同士の間の透光部は、例えば図2に示す中抜きのパターン113内の透光部のような、遮光部101に取り囲まれた透光部であってもよい。

本変形例によると、近接する他のパターンが遮光部よりなる場合と比べて、該他のパターンがマスクエンハンサー構造を持つ場合に、マスクエンハンサー構造を有するパターン（パターン131）における位相シフター幅をより小さくする。すなわち、他のパターンの遮光性が高くなるに従って、パターン131における位相シフター幅を小さくする。このため、他のパターンの存在によって、パターン131の周辺の透光部からパターン131の裏側に回り込んでくる光（透光部と同位相の光）が減少する程度に応じて、パターン131の内部（位相シフター102）を透過する光（透光部と反対位相の光）を減少させることができる。従って、パターン131の遮光性を十分に向上させることができるために、露光マージンが向上すると共に、露光により形成される光強度分布のコントラストが向上する。すなわち、孤立パターンのみではなく、パターン同士が互いに近接するような複雑なパターンが存在するフォトマスクにおいても、マスクエンハンサー構造によりプロセスマージンの向上効果が十分に得られる。また、マスクエンハンサー構造における位相シフター幅を、隣り合う他のパターンの遮光性に応じて最適化することができるので、ランダムなパターン配置の微細パターンの形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

また、本変形例によると、任意の間隔で複数のパターンが配置された密集パターンにおけるマスクエンハンサー構造のパターンについても、露光マージンを最大化できるフォトマスクの実現が可能となる。従って、微細なマスクパターンに

おけるマスクエンハンサー構造による優れたパターン形成特性が、マスクパターンとなる各パターンが任意の近接関係を持つ場合にも発揮されるので、微細パターン形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

尚、本変形例において、マスクエンハンサー構造は、遮光部と位相シフターとから構成される構造として説明してきたが、該遮光部を半遮光部と置き換えてよい。

また、本変形例において、パターン131を構成する部分パターン131A及び部分パターン131Bの線幅を共にL6とした。しかし、部分パターン131A及び131Bのそれぞれの線幅は、W3よりも大きく且つW2以下の範囲内のパターン幅であれば互いに異なっていてもよい。すなわち、部分パターン131Aの線幅をL6Aとし、部分パターン131Bの線幅をL6Bとすると、 $W2 \geq L6A > W3$ 且つ $W2 \geq L6B > W3$ である限り、 $L6A \neq L6B$ であってもよい。また、前記の所定寸法W2及びW3は、第1の実施形態と同様に、 $(W2 - W3) \leq 0.2 \times \lambda / NA$ の関係を満たすことが好ましい。すなわち、部分パターン131Aの線幅L6Aと、部分パターン131Bの線幅L6Bとの差は $(0.2 \times \lambda / NA) \times M$ 以下であることが好ましい。ここで、ウェハ上に形成される所望のパターンの幅が同じであるのに、部分パターン131A（マスクエンハンサー近接部）の線幅L6Aと、部分パターン131B（遮光パターン近接部）の線幅L6Bとが異なる場合、次の様な構成を採用することが好ましい。すなわち、マスクエンハンサー近接部である部分パターン131Aの線幅L6Aと該パターンの中央付近に設けられた位相シフター（位相シフター102A）の幅F6Aとの比 $F6A / L6A$ が、遮光パターン近接部である部分パターン131Bの線幅L6Bと該パターンの中央付近に設けられた位相シフター（位相シフター102B）の幅F6Bとの比 $F6B / L6B$ よりも小さい構成である。

また、本変形例において、マスクエンハンサー近接部である部分パターン131Aと、遮光パターン近接部である部分パターン131Bとが、1つの連続パタ

ーンであるパターン131を構成する場合を例として説明してきた。しかし、前述の各線幅についての関係を満足する限りにおいて、マスクエンハンサー近接部であるパターンと、遮光パターン近接部であるパターンとが、同一の透過性基板上における互いに異なるパターンであってもよい。

また、本変形例において、第1の実施形態と同様に、前記のWOは $0.8 \times \lambda / NA$ 以下であることが好ましく、 $0.3 \times \lambda / NA$ 以上で且つ $0.6 \times \lambda / NA$ 以下であることがより好ましい。第1の実施形態と同様に、前記のSOは λ / NA 以下であることが好ましい。

また、本変形例において、第1の実施形態と同様に、前記のSOは λ / NA 以下であることが好ましい。

第2の実施形態

以下、本発明の第2の実施形態に係るパターン形成方法、具体的には第1の実施形態に係るフォトマスク（以下、本発明のフォトマスク）を用いたパターン形成方法について図面を参照しながら説明する。

図15（a）～（d）は第2の実施形態に係るパターン形成方法の各工程を示す断面図である。

まず、図15（a）に示すように、基板500上に、金属膜又は絶縁膜等の被加工膜501を形成した後、図15（b）に示すように、被加工膜501の上に、ポジ型のレジスト膜502を形成する。

次に、図15（c）に示すように、本発明のフォトマスク、例えば図3（b）に示す第1の実施形態に係るフォトマスクに対して露光光503を照射し、該フォトマスクを透過した透過光504によってレジスト膜502に対して露光を行なう。

尚、図15（c）に示す工程で用いるフォトマスクの透過性基板100上には、露光により転写されるライン状のマスクパターンが設けられている。マスクパ

ターンは、遮光部 101 のみから又は遮光部 101 と位相シフター 102 とから構成されている。また、位相シフター 102 は遮光部 101 に取り囲まれるように形成されている。すなわち、マスクパターンは、遮光部 101 と位相シフター 102 とからなるマスクエンハンサー構造を持つ。また、位相シフター 102 は、例えば透過性基板 100 を掘り下げるこことによって形成されている。

また、図 15 (c) に示す露光工程では、例えば斜入射露光用の光源を用いてレジスト膜 502 に対して露光を行なう。このとき、図 15 (c) に示すように、現像工程でレジストが溶解するに足りる露光エネルギーが照射されるのは、マスクパターン以外の領域と対応するレジスト膜 502 の潜像部分 502a のみである。

次に、レジスト膜 502 に対して現像を行なって潜像部分 502a を除去することにより、図 15 (d) に示すように、マスクパターンと対応するレジストパターン 505 を形成する。

第 2 の実施形態によると、本発明のフォトマスク（具体的には第 1 の実施形態に係るフォトマスク）を用いたパターン形成方法であるため、第 1 の実施形態と同様の効果が得られる。また、レジストが塗布された基板（ウェハ）に対して本発明のフォトマスクを介して斜入射露光を行なうときに、位相シフター（開口部）102 を有するマスクエンハンサーは非常に強い遮光性を有するので、マスクエンハンサー以外の他の領域と対応するレジストのみに対して、現像工程で溶解するのに十分な露光エネルギーが照射される。さらに、マスクエンハンサーにより形成される遮光像のコントラストは非常に高いと共に該遮光像のデフォーカス特性は優れているため、D.O.F の高い微細パターン形成が可能となる。

尚、第 2 の実施形態において、遮光部 101 と位相シフター 102 とからなるマスクエンハンサー構造のフォトマスクを用いたが、これに代えて、半遮光部と位相シフターとからなるマスクエンハンサー構造のフォトマスクを用いてもよい。

また、第2の実施形態において、ポジ型レジストプロセスを用いたが、これに代えて、ネガ型レジストプロセスを用いても、同様の効果が得られる。

また、第2の実施形態において、図15(c)に示す露光光を照射する工程では斜入射照明法（斜入射露光法）を用いることが好ましい。このようにすると、本発明のフォトマスクを透過した光の光強度分布において、マスクパターン及び透光部のそれぞれと対応する部分の間でのコントラストが向上する。また、光強度分布のフォーカス特性も向上する。従って、パターン形成における露光マージン及びフォーカスマージンが向上する。言い換えると、デフォーカス特性に優れた微細パターン形成が可能となる。さらには、フォトマスク上においてマスクエンハンサー構造を持つパターン同士が近接する場合にも、露光時における各パターンのコントラストが大きく向上する。

ここで、斜入射露光用の光源とは、図16(a)に示すような通常露光用の光源に対して、垂直入射成分（光源からフォトマスクに対して垂直に入射する露光光の成分）が取り除かれた、図16(b)～(d)に示すような光源のことを意味する。代表的な斜入射露光用の光源としては、図16(b)に示す輪帶露光用の光源、及び図16(c)に示す四重極露光用の光源がある。目的のパターンに若干依存するが、一般に、輪帶露光用の光源よりも四重極露光用の光源の方がコントラストの強調又はDOFの拡大において効果的である。しかし、四重極露光においてはパターン形状がマスク形状に対して歪むなどの副作用もあるので、そのような場合には、図16(d)に示す輪帶一四重極混成型露光用の光源を用いることが望ましい。この輪帶一四重極混成型露光用の光源の特徴は、光源中心（通常露光光源の中心）を原点としてXY座標を想定したときに、光源中心とXY軸上の光源とが取り除かれていることによって四重極露光用の光源の特徴を有する点と、光源の外形として円形が採用されていることにより輪帶露光用の光源の特徴を有する点とである。

第3の実施形態

以下、本発明の第3の実施形態に係るマスクデータ作成方法、具体的には、第1の実施形態に係るフォトマスク（以下、本発明のフォトマスク）のマスクデータ作成方法について図面を参照しながら説明する。尚、本実施形態において、フォトマスクの各構成要素の機能及び性質等は、特に断らない限り、既述の本発明のフォトマスクにおける対応する構成要素と同じである。

具体的な処理内容を説明する前に、本発明のフォトマスクのマスクデータ作成方法において重要なポイントについて説明する。マスクエンハンサー構造を有するマスクパターンを用いてパターン形成を行なう場合、1つの孤立パターンを形成するにあたっても、マスクエンハンサー構造における位相シフターの幅とそれを囲む遮光部又は半遮光部の幅とが関係してくる。そのため、形成されるパターンの寸法つまり CD (Critical Dimension) を所望の値にするために、前記の位相シフターの幅、及び遮光部又は半遮光部の幅等の複数の要素の値を決定する必要がある。また、多くの場合、所望の CD を実現する前記の要素の値の組み合わせは1つではなく複数存在する。そこで、本実施形態では、パターン形成におけるマージンを最大化するために重要となる要素を優先的に決定し、その後、パターン形成におけるマージンに与える影響が低い要素によりパターン寸法を調整する方法を採用する。

すなわち、パターン形成におけるマージンに対する影響度の高い要素として、第1に、位相シフターの配置位置及び幅を決定し、その後、位相シフターを囲む遮光部又は半遮光部の幅、つまり位相シフターと透光部とに挟まれた領域の幅を調整することによって所望の CD を実現するマスクデータの作成を行なうことが好ましい。このようなマスクデータの作成を実施することによって、高精度なパターン寸法制御を達成しつつ、パターン形成におけるマージンの高いフォトマスクを実現できるマスクデータの作成が可能となる。以下、具体的な処理内容について説明する。

図17は、第3の実施形態に係るマスクデータ作成方法、具体的には、微細な所望のパターンに基づき、マスク上で遮光パターンとなるLSI用マスクパターンを作成する方法のフロー図である。また、図18(a)～(f)は、第3の実施形態に係るマスクデータ作成方法の各工程における具体的なマスクパターン作成例を示す図である。

図18(a)は、マスクパターンによって形成しようとする所望のパターンを示している。すなわち、図18(a)に示すパターン600が、本発明のフォトマスクを用いた露光においてレジストを感光させたくない領域(所望の非感光領域)に相当するパターンである。尚、本実施形態でパターン形成について説明する場合、特に断らない限り、ポジ型レジストプロセスの使用を前提として説明を行なう。すなわち、現像により、レジストの感光部が除去され且つレジストの非感光部がレジストパターンとして残存することを想定して説明を行なう。従って、ネガ型レジストプロセスを使用する場合には、レジストの感光部がレジストパターンとして残存し且つレジストの非感光部が除去されると考えれば、基本的に本実施形態と同様である。

まず、ステップS1において、図18(a)に示す所望のパターン600を、マスクデータ作成に用いるコンピュータに入力する。

次に、ステップS2において、作成したフォトマスクを露光するときにオーバー露光にするか又はアンダー露光にするかに応じて、図18(a)に示す所望のパターンを拡大し又は縮小するリサイズを行なう。或いは、パターン形成以後における種々の工程、例えばドライエッティングやCMP等の工程で生じる寸法変化を考慮して、リソグラフィ工程段階での寸法を意図的に調整するためのリサイズを行なってもよい。図18(b)は、リサイズ後のパターン(遮光パターン)601を示している。

次に、ステップS3において、図18(c)に示すように、パターン601における寸法(幅)が所定値以下である領域の中心部に位相シフトパターン602

を生成する。すなわち、マスクエンハンサー構造における位相シフターの形状（配置位置及び幅等：以下同じ）を決定する。このとき、位相シフトパターン602がパターン601の内部つまり遮光パターンの内部に完全に含有されるようする。尚、本実施形態では、簡単のため、パターン601は、複数の独立したライン状パターンから構成されているものとし、パターン601の幅とは線幅を意味するものとする（位相シフトパターン602の幅についても同様である）。但し、ここで、ライン状パターンとは、ライン状の外形を有するパターンのみならず、任意のパターンに含有され且つ露光波長の2倍以上の長さを有する矩形領域をも意味するものとする。また、パターン同士の間隔とは、互いに分離されたパターン同士の間隔のみを意味するものではなく、例えば図2に示す中抜きのパターン113のようなパターン（中抜き图形）においてライン状の矩形領域によって挟まれた透光部の幅も、ライン状のパターン同士の間隔として定義する。

位相シフトパターン602の幅については例えば次のように設定することができる。すなわち、少なくとも1つの所定寸法W0を定め、パターン601における幅がW0以下である領域には所定寸法F0（ $W0 > F0$ ）の幅を有する位相シフトパターン602を配置する。また、好ましくは、少なくとも2つの所定寸法W0及びW1（ $W0 > W1$ ）を定め、パターン601における幅がW1よりも大きく且つW0以下である領域には所定寸法F0の幅を有する位相シフトパターン602を配置すると共に、パターン601における幅がW1以下である領域には所定寸法F1（ $F1 > F0$ ）の幅を有する位相シフトパターン602を配置する。さらに、3つ以上の所定寸法（W0、W1、W2……： $W0 > W1 > W2 \dots$ ）を定め、パターン601における幅がW0以下である領域においては、その幅が細くなるほど太い位相シフトパターンを設ける方法（言い換えると、マスクパターン幅が太くなるほど細い位相シフトパターンを設ける方法）がより好ましいことはマスクエンハンサーの原理から言うまでもない。

次に、ステップS4において、図18（d）に示すように、パターン601を

構成する各ライン状パターンの近接関係に基づいて、位相シフトパターン602の幅を調整する。具体的には、一のライン状パターンと透光部（本実施形態ではパターン601の存在しない領域）を挟んで近接する他のライン状パターンから一のライン状パターンまでの距離に基づき、一のライン状パターンに配置される位相シフトパターン602の幅を調整する。尚、図18（d）において、位相シフトパターン603は、寸法調整された位相シフトパターンである。

位相シフトパターン幅の具体的な調整方法例は次の通りである。少なくとも1つの所定寸法S0を定め、調整対象の位相シフトパターンが配置されるライン状パターン（対象パターン）がS0以下の距離で他のライン状パターン（他のパターン）と近接していない場合における位相シフトパターン幅をFOAとすると共に、対象パターンがS0以下の距離で他のパターンと近接する場合における位相シフトパターン幅をFOB（FOA>FOB）とする。また、好ましくは、少なくとも2つ所定寸法S0及びS1（S0>S1）を定め、対象パターンがS0以下の距離で他のパターンと近接していない場合における位相シフトパターン幅をFOAとし、対象パターンがS1よりも大きく且つS0以下の距離で他のパターンと近接する場合における位相シフトパターン幅をFOBとし、対象パターンがS1以下の距離で他のパターンと近接する場合における位相シフトパターン幅をFOC（FOB>FOC）とする。さらに、3つ以上の所定寸法（S0、S1、S2・・・：S0>S1>S2・・・）を定め、対象パターンと他のパターンとの間隔が小さくなるに従って、位相シフトパターン幅を小さくする方法がより好ましいことは第1の実施形態の説明から言うまでもない。

また、前述の位相シフトパターン幅の調整方法に加えて、対象パターンに近接する他のパターンが単純な遮光パターンであるか又は位相シフトパターンが配置されるマスクエンハンサー構造のパターンであるかに応じて、以下のような位相シフトパターン幅の調整を行なうことが好ましい。すなわち、位相シフトパターンが配置される対象パターン、つまり着目しているパターンに近接している他の

パターンにも位相シフトパターンが配置されるか否かは、該他のパターンの幅に基づいて判断することができる。よって、近接する他のパターンの幅が所定寸法W0よりも大きい場合（つまり他のパターンに位相シフトパターンを配置しない場合）における対象パターンに配置する位相シフトパターンの幅をF0Bとし、近接する他のパターンの幅が所定寸法W0以下の場合（つまり他のパターンに位相シフトパターンを配置する場合）における対象パターンに配置する位相シフトパターンの幅をF0M（ $F0B > F0M$ ）とする。

さらに、対象パターンの両側にそれぞれ他のパターンが近接する場合には、次のように位相シフトパターン幅の調整を行なうことが好ましい。すなわち、対象パターンの両側に近接する各他のパターンのそれぞれから対象パターンまでの距離S1及びS2を求め、 $(S1 + S2) / 2$ が所定の値以下となる場合における位相シフトパターン幅を、 $(S1 + S2) / 2$ が前記の所定の値よりも大きくなる場合における位相シフトパターン幅よりも小さく設定する。或いは、位相シフトパターン幅の調整における対象パターンと各他のパターンとの間隔の評価において、対象パターンの両側における各他のパターンとの間隔を平均化することが好ましいことを考慮して、前述の調整方法に代えて、次のような調整方法を用いてもよい。すなわち、例えば、対象パターンの左側における他のパターンとの間隔がS1であり、対象パターンの右側における他のパターンとの間隔がS2である場合における、対象パターンに設ける位相シフトパターンの幅をFとする。また、対象パターンの左右両側における各他のパターンとの間隔が共にS1である場合における、対象パターンに設ける位相シフトパターンの幅F1とし、対象パターンの左右両側における各他のパターンとの間隔が共にS2である場合における、対象パターンに設ける位相シフトパターンの幅F2とする。このとき、 $F = (F1 + F2) / 2$ となるように位相シフトパターン幅を調整することが好ましい。さらに、前述の平均化においてS1又はS2が所定寸法S0以上である場合には、当該S1又はS2をS0とみなして前述の平均化を行なうことが好ましい。

以上に説明したステップS 3及びS 4の処理により、パターン形成におけるマージンに対する影響の大きい位相シフターの配置位置及び幅が最適なものとなるように決定されることになる。

次に、ステップS 5において、ステップS 4までに決定された位相シフトパターン603の形状に基づいて、図18(e)に示すように、パターン(遮光パターン)601における位相シフトパターン603を除く部分である遮光部パターン604を定義する。続いて、本実施形態のマスクデータ作成方法を用いて作製されるフォトマスク(本発明のフォトマスク)に対して露光を行なうときに、マスクパターンと対応して所望の寸法を持つパターンが形成されるようにマスクパターンの寸法調整を行なう処理の準備を行なう。すなわち、通常OPC(Optical Proximity Correction)処理と呼ばれる処理の準備を行なう。本実施形態では、パターン形成時の寸法(レジストパターンの寸法)つまりCDを予測して該結果に基づきマスクパターンの寸法調整を行なう際に、遮光部と透光部との境界のみを移動させる。そのため、ステップS 5において、遮光部パターン604における透光部との境界となるエッジをCD調整用エッジ605に設定する。これにより、位相シフトパターン603が配置されたパターン領域においては、位相シフトパターン603と透光部とに挟まれた遮光部パターン604の幅によってCDを調整することが可能となる。よって、パターン間の近接関係に応じて幅を調整された位相シフトパターン603を変形することなく、所望のCDを実現できるマスクパターンの作成が可能となる。尚、遮光部パターン604に代えて半遮光部パターンを配置してもよいことは言うまでもない。

次に、ステップS 6において、マスクパターンに配置される位相シフトパターン603の透過率つまり位相シフターの透過率を設定する。

次に、ステップS 7、ステップS 8及びステップS 9において、OPC処理(例えばモデルベースOPC処理)を行なう。具体的には、ステップS 7において

、光学原理及びレジスト現像特性を考慮したシミュレーションによって、遮光部パターン604と位相シフトパターン603とが配置されたパターンによって露光時に形成されるレジストパターンの寸法を予測する。このとき、シミュレーションにおいて、リソグラフィ工程のみではなく、パターン形成に係わる他の工程、例えばドライエッティング等を考慮してもよい。続いて、ステップS8において、予測されたレジストパターンの寸法が所望の寸法と一致しているかどうかを調べる。所望の寸法と一致していない場合、ステップS9において、レジストパターンの予測寸法と所望の寸法との差に基づきCD調整用エッジ605を移動させ、それによって遮光部パターン604の変形つまりマスクパターンの変形を行なう。

尚、本実施形態では、予め位相シフトパターンを生成しているため、ステップS3及びS4で位相シフトパターンの幅を不適切に設定してしまっている場合、ステップS7～S9で所望のCDを得ることができない。このような場合、その不適切な位相シフトパターン幅を修正してもよい。尚、不適切な位相シフターとは、位相シフターを囲む遮光部の幅が0となっても、予測されるCDが所望のCDよりも太くなってしまうような位相シフターのことである。このため、不適切な位相シフターを生成している場合、所望のCDを得るためにには位相シフター幅を細くする以外に方法がない。よって、ステップS3及びS4で生成する位相シフトパターンについては、その周辺に遮光部が存在しない場合でも、予測されるCDが所望のCDを超えないような線幅に設定しておくことが好ましい。このように位相シフトパターンを生成しておけば、ステップS7～S9を行なう段階で位相シフトパターンの修正を行なう必要がなくなる。ここで、マスクパターンを位相シフターのみから構成した場合において予測されるCDが所望CDを超えない最大の位相シフター幅を、CD値に対する最大位相シフター幅と呼ぶことにする。すなわち、ステップS3及びS4で生成する位相シフトパターンの幅は、CD値に対する最大位相シフター幅を越えないように設定されていることが好まし

い。尚、CD値に対する最大位相シフター幅は、位相シフターの透過率及び露光条件が決まればシミュレーション等により容易に求めることができる。

以上のように、本実施形態の特徴は、ステップS4までに決定された位相シフトパターン603に対して、ステップS5で設定されたCD調整用エッジ605のみを変化させることにより、所望の寸法を持つレジストパターンを形成できるマスクパターンを実現することである。すなわち、ステップS7～S9を、レジストパターンの予測寸法と所望の寸法とが一致するまで繰り返すことにより、最終的に、ステップS10において、所望の寸法を持つレジストパターンを形成できるマスクパターンを出力する。図18(f)は、ステップS10で出力されたマスクパターンの一例を示している。図18(f)に示すように、透過性基板100上における遮光部パターン604に対応する領域には、Cr膜等よりなる遮光部101が形成されている。また、透過性基板100上における位相シフトパターン603に対応する領域には、例えば透過性基板100が掘り下げられてなる位相シフター102が形成されている。

尚、図18(f)において、遮光部101と位相シフター102とからなるマスクエンハンサー構造を持つライン状パターンの端部610が、幅太のハンマー形状を有しているが、これは、該ライン端部610と対応するレジストパターンの後退を防止するためのものである。また、このようなハンマー形状のライン端部においては、その線幅が所定値を超えるような場合であっても、その中央部に、遮光性を向上させるための位相シフターが配置されていてもよい。なぜなら、通常のラインパターンにおいては、その両側2方向(ライン方向に対して垂直な方向)の透光部から光が回り込んでくるのに対して、ライン端部においては、前述の2方向の透光部に加えてライン端側の透光部からも、つまり3方向から光が回り込んでくるため、所定値を超える幅を持つ場合にも位相シフターを配置することが可能になるからである。

以上に説明したように、第3の実施形態によると、コントラスト等の重要なパ

ターン形成特性が優れたマスクを実現するために、まず、重要なパラメータである位相シフトパターンの幅及び配置位置を決定する。その後、CD調整用エッジ605として設定された、パターン601の最外エッジのみを移動させてパターン寸法制御を行なう。このため、一旦決定した位相シフトパターン幅等を変更することなく、言い換えると、優れたパターン形成特性が発揮される条件を保ちながら、微細な所望のパターンを形成できるマスクパターンを実現できる。すなわち、微細な所望のパターンを形成でき且つ優れたパターン形成特性を持つマスクパターンを実現できる。

また、第3の実施形態によると、近接する他のパターンから、マスクエンハンサー構造を有するパターン（対象パターン）までの距離に基づいて、マスクエンハンサー構造の位相シフターの幅を調整する。具体的には、他のパターンとの間の距離が小さくなるに従って位相シフター幅を小さくする。このため、他のパターンの存在によって、対象パターンの周辺の透光部から対象パターンの裏側に回り込んでくる光（透光部と同位相の光）が減少する程度に応じて、対象パターンの内部（位相シフター）を透過する光（透光部と反対位相の光）を減少させることができる。従って、対象パターンの遮光性を十分に向上させることができるために、露光マージンが向上すると共に、露光により形成される光強度分布のコントラストが向上する。すなわち、孤立パターンのみではなく、パターン同士が互いに近接するような複雑なパターンが存在するフォトマスクにおいても、優れたパターン形成特性を実現することができる。また、マスクエンハンサー構造における位相シフター幅を各パターン間の近接関係に応じて最適化することができるのランダムなパターン配置の微細パターンの形成を可能とするフォトマスクを実現できる。

尚、第3の実施形態において、遮光部を用いたマスクエンハンサー構造を持つマスクパターンを対象として説明を行なったが、これに代えて、半遮光部を用いたマスクエンハンサー構造を持つマスクパターンを対象としてもよい。具体的に

は、本実施形態でマスクエンハンサー構造の遮光部として説明をしている箇所を全て半遮光部に置き換えてよい。

また、第1～第3の実施形態において、透過型のフォトマスクを想定して説明してきた。しかし、本発明はこれに限定されるものではなく、例えば透過率を反射率と読み替える等して、露光光の透過現象を全て反射現象に置き換えて考えれば、反射型マスクについても本発明は成り立つものである。

産業上の利用可能性

以上に説明したように、本発明は、フォトマスク、そのフォトマスクを用いたパターン形成方法及びマスクデータ作成方法に関し、半導体集積回路装置等の製造に用いられる微細パターン形成に適用する場合等に特に有用である。

請求の範囲

1. 透過性基板上に形成されたマスクパターンと、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクであって、

前記マスクパターンは、前記透光部を基準として露光光を反対位相で透過させる位相シフターと該位相シフターを囲む遮光部とからなるマスクエンハンサー構造をそれぞれ持つ第1パターン及び第2パターンを有し、

前記第1パターンは、前記透光部を挟んで所定の寸法以下の距離で、前記マスクパターンのうちの第3パターンと近接しており、

前記第1パターンにおける前記マスクエンハンサー構造の位相シフター幅は、前記第2パターンにおける前記マスクエンハンサー構造の位相シフター幅よりも小さいことを特徴とするフォトマスク。

2. 請求項1において、

前記透光部における前記第2パターンの両側の領域は所定の寸法よりも大きい幅を有することを特徴とするフォトマスク。

3. 請求項2において、

前記第3パターンは、前記マスクエンハンサー構造を持つか又は遮光部よりも大きいことを特徴とするフォトマスク。

4. 請求項3において、

前記第3パターンにおける前記マスクエンハンサー構造の遮光部に代えて、前記透光部を基準として前記露光光を同位相で且つ部分的に透過させる半遮光部が設けられていることを特徴とするフォトマスク。

5. 請求項1において、

前記第2パターンは、前記透光部を挟んで前記所定の寸法以下の距離で、前記マスクパターンのうちの第4のパターンと近接しており、

前記第2パターンと前記第4パターンとの間の距離は、前記第1パターンと前記第3パターンとの間の距離よりも大きいことを特徴とするフォトマスク。

6. 請求項5において、

前記第3パターン及び前記第4パターンは、前記マスクエンハンサー構造を持つか又は遮光部よりなることを特徴とするフォトマスク。

7. 請求項6において、

前記第3パターン及び前記第4パターンのそれぞれにおける前記マスクエンハンサー構造の遮光部に代えて、前記透光部を基準として前記露光光を同位相で且つ部分的に透過させる半遮光部が設けられていることを特徴とする記載のフォトマスク。

8. 請求項1において、

前記第2パターンは、前記透光部を挟んで、前記第1パターンと前記第3パターンとの間の距離と同等の距離で、前記マスクパターンのうちの第5のパターンと近接しており、

前記第3パターンは前記マスクエンハンサー構造を持ち、

前記第5パターンは遮光部よりなることを特徴とするフォトマスク。

9. 請求項8において、

前記第3パターンにおける前記マスクエンハンサー構造の遮光部に代えて、前記透光部を基準として前記露光光を同位相で且つ部分的に透過させる半遮光部が

設けられていることを特徴とするフォトマスク。

10. 請求項1において、

前記第1パターンと前記第2パターンとは接続しており、それによって1つの連続パターンが構成されていることを特徴とするフォトマスク。

11. 請求項1において、

前期所定の寸法は $(\lambda / N.A.) \times M$ 以下であることを特徴とするフォトマスク（但し、 λ は前記露光光の波長であり、M及びN.A.は露光機の縮小投影光学系の縮小倍率及び開口数である）。

12. 請求項1において、

前記第1パターン及び前記第2パターンのそれぞれの幅は $(0.8 \times \lambda / N.A.) \times M$ 以下であることを特徴とするフォトマスク（但し、 λ は前記露光光の波長であり、M及びN.A.は露光機の縮小投影光学系の縮小倍率及び開口数である）。

13. 請求項1.2において、

前記第1パターンの幅と前記第2パターンの幅との差は $(0.2 \times \lambda / N.A.) \times M$ 以下であることを特徴とするフォトマスク。

14. 請求項1.3において、

前記第1パターンにおける前記マスクエンハンサー構造の位相シフター幅の前記第1パターンの幅に対する比は、前記第2パターンにおける前記マスクエンハンサー構造の位相シフター幅の前記第2パターンの幅に対する比よりも小さいことを特徴とするフォトマスク。

15. 請求項1において、

前記第1パターン及び前記第2パターンのそれぞれにおける前記マスクエンハンサー構造の遮光部に代えて、前記透光部を基準として前記露光光を同位相で且つ部分的に透過させる半遮光部が設けられていることを特徴とするフォトマスク。

16. 請求項15において、

前記半遮光部は、前記透光部を基準として前記露光光を $(-30 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(30 + 360 \times n)$ 度以下の位相差で透過させることを特徴とするフォトマスク(但し n は整数)。

17. 請求項15において、

前記半遮光部は、厚さ $30 nm$ 以下の金属薄膜よりなることを特徴とするフォトマスク。

18. 請求項1において、

前記第1パターン及び前記第2パターンのそれぞれにおける前記マスクエンハンサー構造の位相シフターは、前記透光部を基準として前記露光光を $(150 + 360 \times n)$ 度以上で且つ $(210 + 360 \times n)$ 度以下の位相差で透過させることを特徴とするフォトマスク(但し n は整数)。

19. 請求項1において、

前記第1パターン及び前記第2パターンのそれぞれにおける前記マスクエンハンサー構造の位相シフターは、前記透過性基板を掘り下げることにより形成されていることを特徴とするフォトマスク。

20. 透過性基板上に形成されたマスクパターンと、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクであって、

前記マスクパターンは、前記透光部を基準として露光光を反対位相で透過させる位相シフターと該位相シフターを囲む遮光部とからなるマスクエンハンサー構造を持つ一のパターンと、前記透光部を挟んで前記一のパターンと隣り合う他のパターンとを有し、

前記一のパターンにおける前記マスクエンハンサー構造の位相シフター幅は、前記一のパターンと前記他のパターンとの間の距離が小さくなるに従って小さく設定されることを特徴とするフォトマスク。

21. 透過性基板上に形成されたマスクパターンと、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクであって、

前記マスクパターンは、前記透光部を基準として露光光を反対位相で透過させる位相シフターと該位相シフターを囲む遮光部とからなるマスクエンハンサー構造を持つ一のパターンと、前記透光部を挟んで前記一のパターンと隣り合う他のパターンとを有し、

前記一のパターンにおける前記マスクエンハンサー構造の位相シフター幅は、前記他のパターンが遮光部よりなる場合と比べて、前記他のパターンが前記マスクエンハンサー構造を持つ場合に、より小さく設定されることを特徴とするフォトマスク。

22. 請求項1のフォトマスクを用いたパターン形成方法であって、

基板上にレジスト膜を形成する工程と、

前記レジスト膜に前記フォトマスクを介して前記露光光を照射する工程と、

前記露光光を照射された前記レジスト膜を現像してレジストパターンを形成する工程とを備えていることを特徴とするパターン形成方法。

23. 請求項22において、

前記露光光を照射する工程で斜入射照明法を用いることを特徴とするパターン形成方法。

24. 透過性基板上に形成されたマスクパターンと、前記透過性基板における前記マスクパターンが形成されていない透光部とを有するフォトマスクのマスクデータ作成方法であって、

前記フォトマスクを介して露光光をレジストに照射することによって形成される前記レジストの所望の非感光領域と対応するパターンを作成する工程と、

前記パターンの内部に配置され且つ前記透光部を基準として前記露光光を反対位相で透過させる位相シフターの形状を決定する工程と、

前記パターンと前記透光部を挟んで近接する他のパターンから前記パターンまでの距離に基づいて、前記位相シフターの幅を調整する工程と、

前記パターンにおける前記透光部との境界となるエッジをCD調整用エッジに設定する工程と、

シミュレーションを用いて、前記位相シフターが配置された前記パターンにより形成されるレジストパターンの寸法を予測する工程と、

前記予測されたレジストパターンの寸法が所望の寸法と一致しない場合、前記CD調整用エッジを移動させることにより前記パターンの変形を行なう工程とを備えていることを特徴とするマスクデータ作成方法。

25. 請求項24において、

前記パターンは、前記透光部を基準として露光光を同位相で透過させる半遮光部を有することを特徴とするマスクデータ作成方法。

26. 請求項24において、

前記位相シフターの形状を決定する工程は、

前記位相シフターの幅として、少なくとも2つ以上の異なる幅を設定する工程と、

前記パターンが所定の幅以下の細い幅を持つ場合における前記位相シフターの幅を、前記パターンが前記所定の幅を越える幅を持つ場合における前記位相シフターの幅よりも大きく設定する工程とを含むことを特徴とするマスクデータ作成方法。

27. 請求項24において、

前記位相シフターの幅を調整する工程は、

前記位相シフターの幅として、少なくとも2つ以上の異なる幅を設定する工程と、

前記パターンと前記他のパターンとの間隔が所定の寸法以下である場合の前記位相シフターの幅を、前記パターンと前記他のパターンとの間隔が前記所定の寸法よりも大きい場合の前記位相シフターの幅よりも小さく設定する工程とを含むことを特徴とするマスクデータ作成方法。

28. 請求項24において、

前記位相シフターの幅を調整する工程は、

前記位相シフターの幅として、少なくとも2つ以上の異なる幅を設定する工程と、

前記パターンが所定の寸法以下の間隔で前記他のパターンと近接すると共に前記他のパターンに他の位相シフターが配置される場合における前記位相シフターの幅を、前記パターンが前記所定の寸法以下の間隔で前記他のパターンと近接すると共に前記他のパターンに他の位相シフターが配置されない場合における前記

位相シフターの幅よりも小さく設定する工程とを含むことを特徴とするマスクデータ作成方法。

29. 請求項 24 において、

前記他のパターンは、前記パターンの両側にそれぞれ近接する 2 つのパターンであり、

前記位相シフターの幅を調整する工程は、

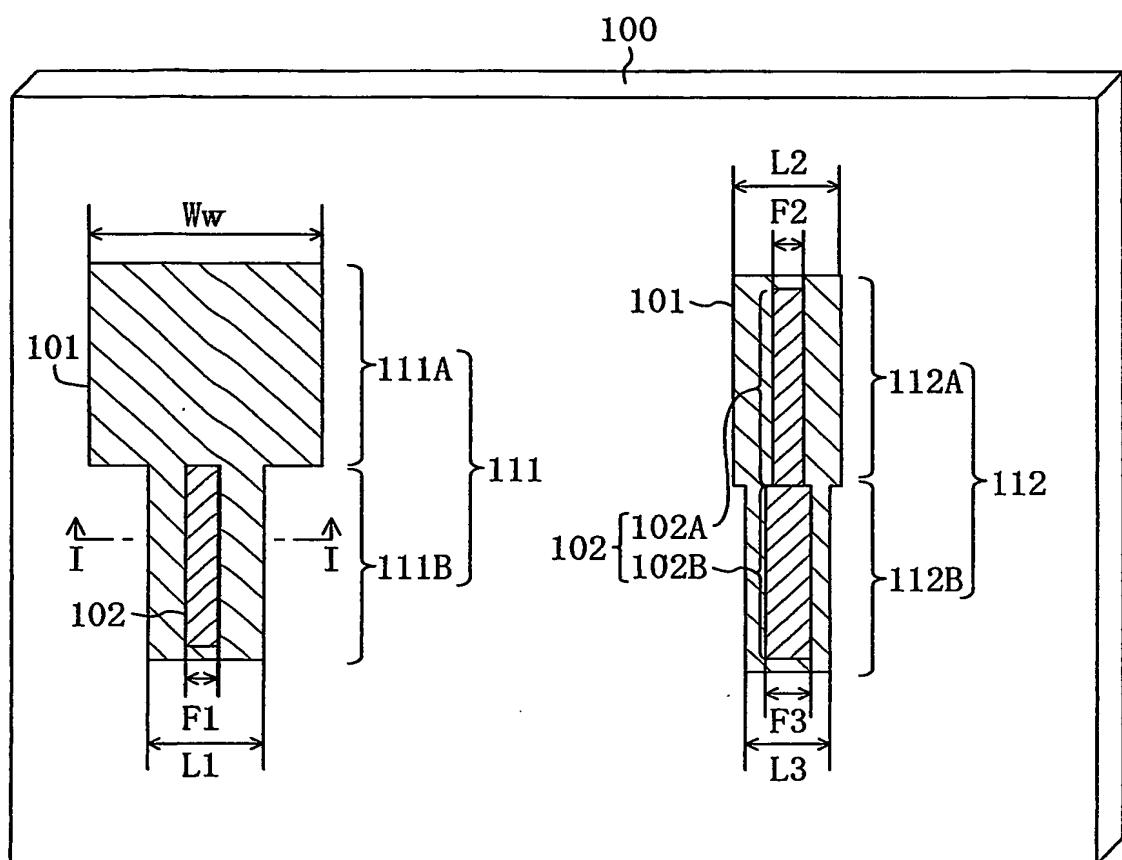
前記位相シフターの幅として、少なくとも 2 つ以上の異なる幅を設定する工程と、

前記パターンの両側に近接する前記各他のパターンのそれぞれから前記パターンまでの距離 S_1 及び S_2 を求める工程と、

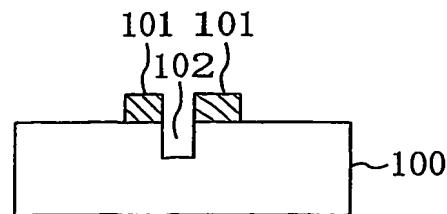
$(S_1 + S_2) / 2$ が所定の値以下となる場合における前記位相シフターの幅を、 $(S_1 + S_2) / 2$ が前記所定の値よりも大きくなる場合における前記位相シフターの幅よりも小さく設定する工程とを含むことを特徴とするマスクデータ作成方法。

FIG. 1

(a)



(b)



(c)

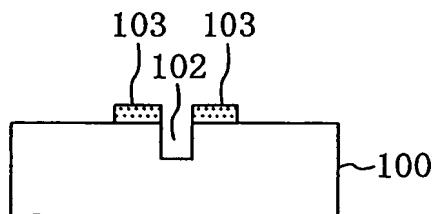


FIG. 2

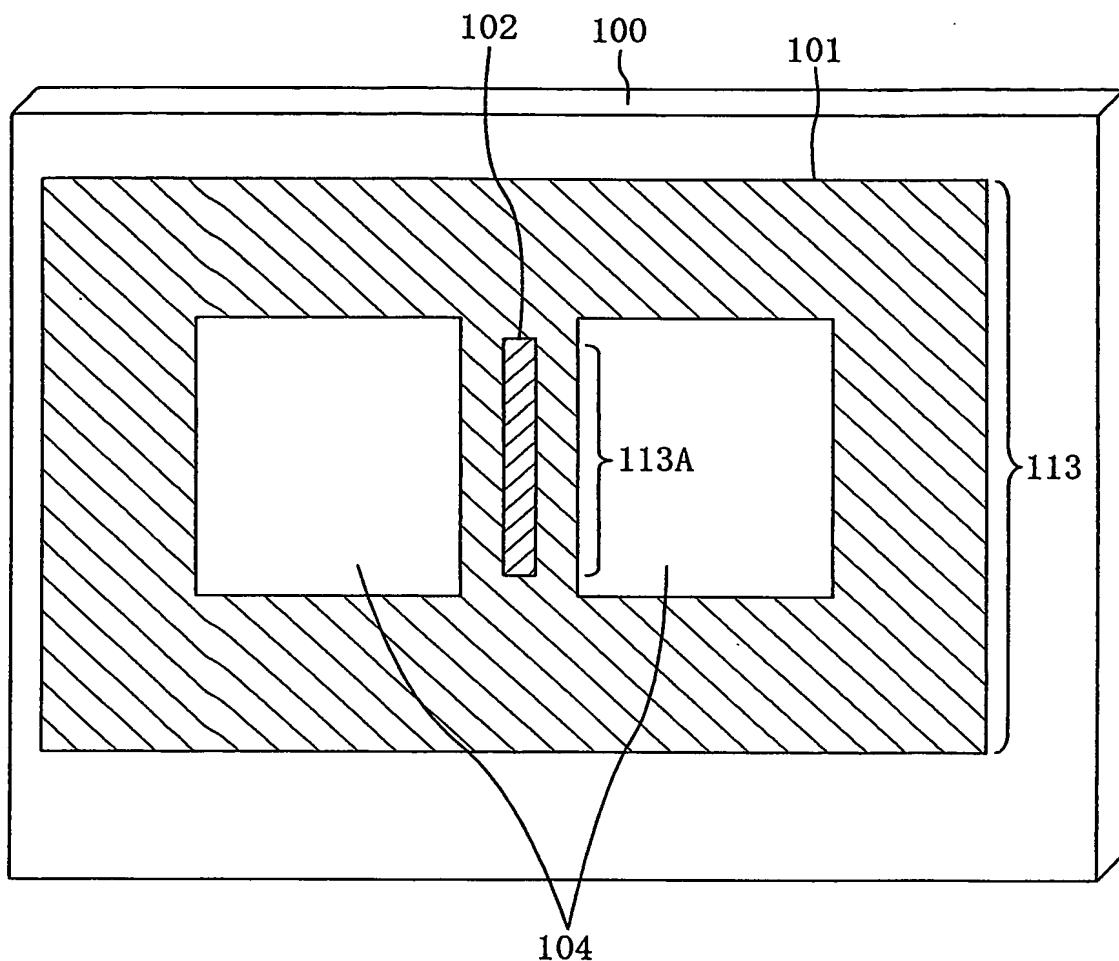
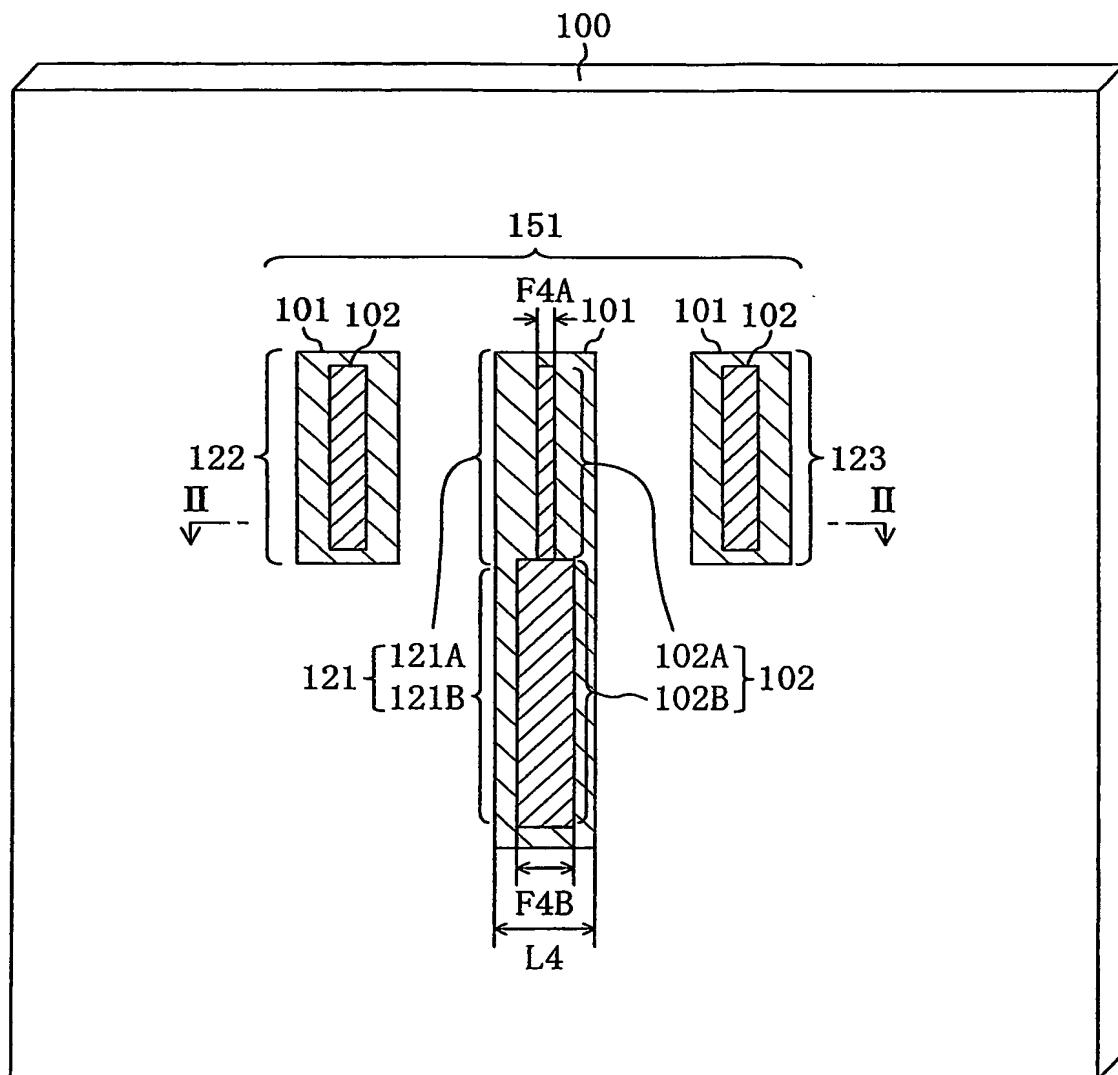


FIG. 3

(a)



(b)

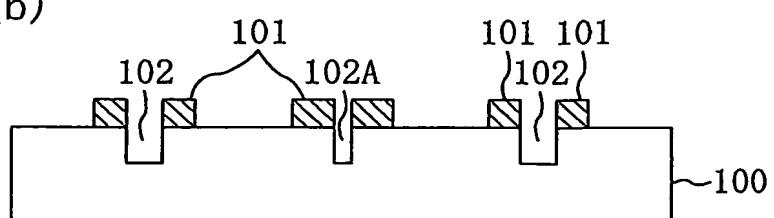


FIG. 4

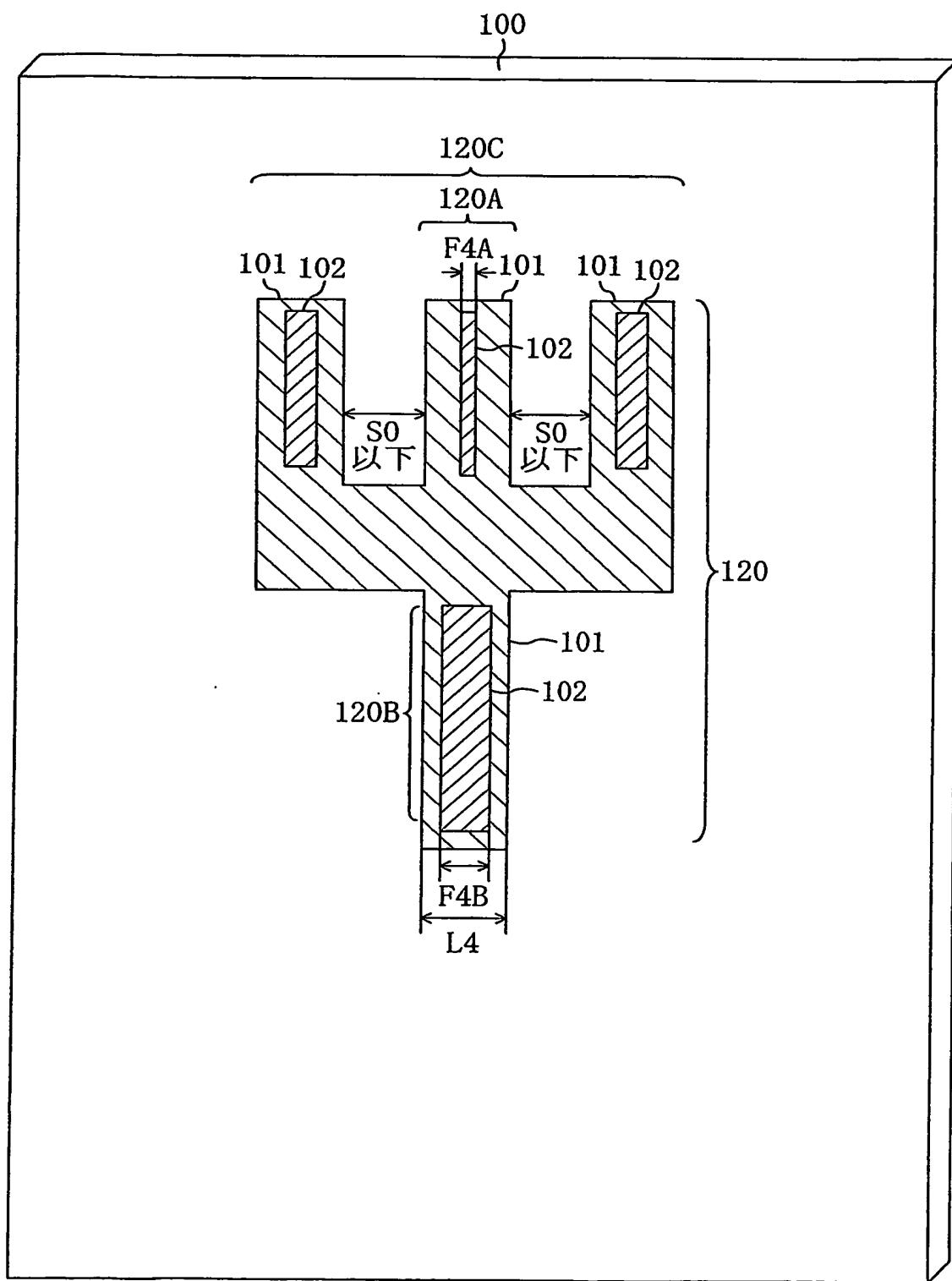


FIG. 5

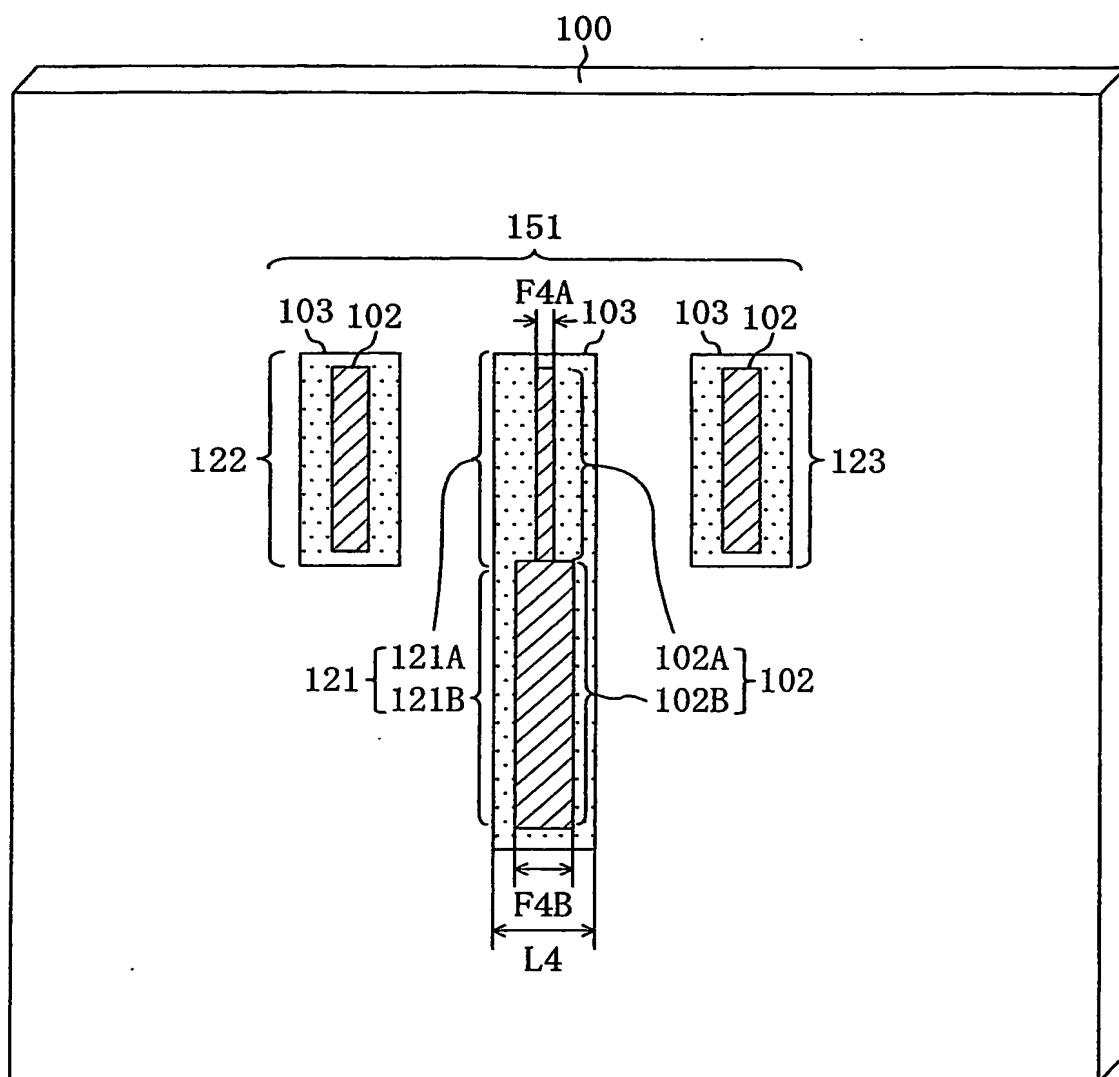


FIG. 6

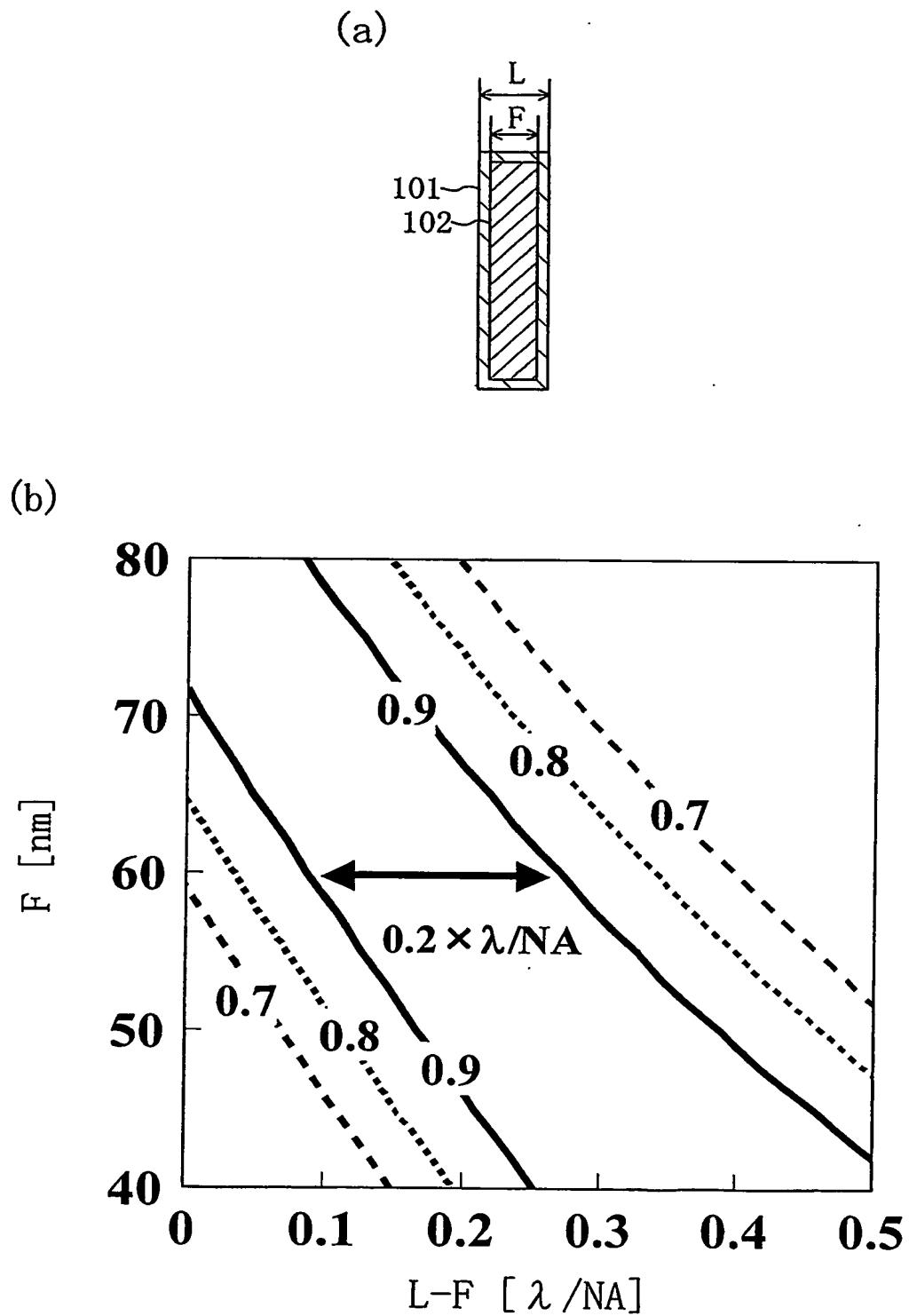
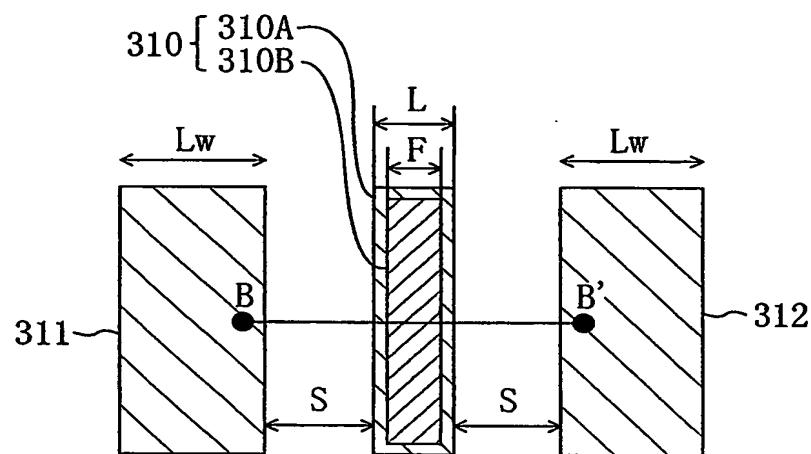
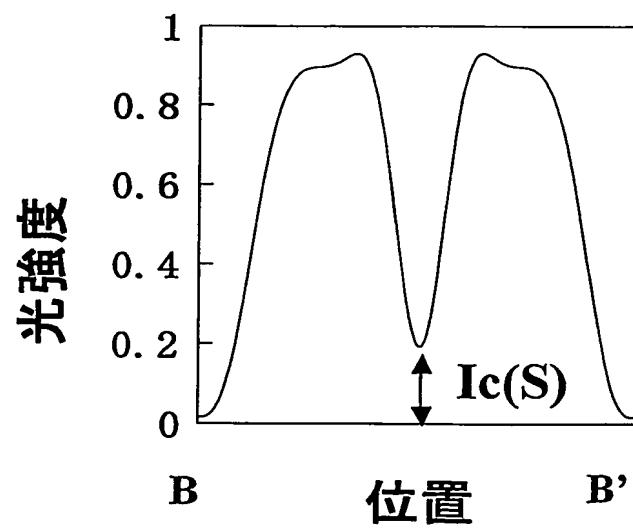


FIG. 7

(a)



(b)



8/18

FIG. 8

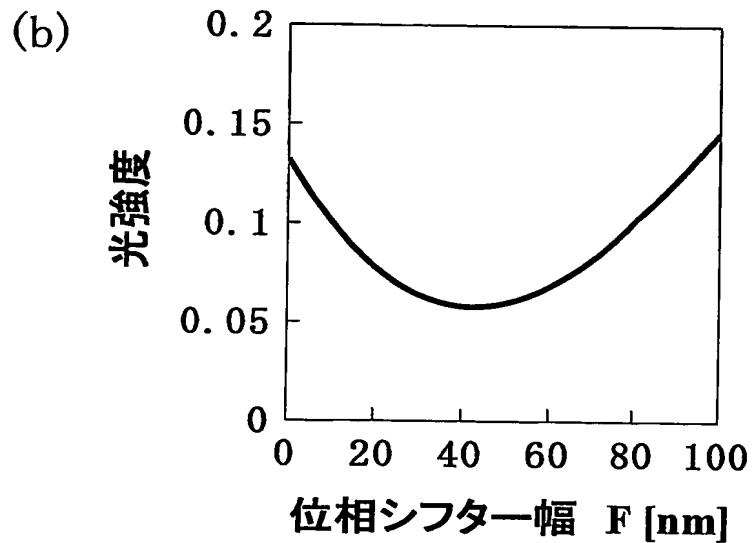
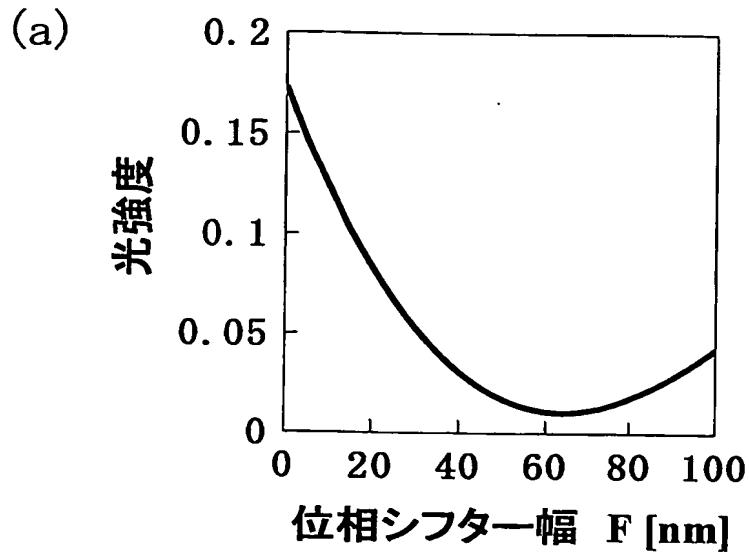


FIG. 9

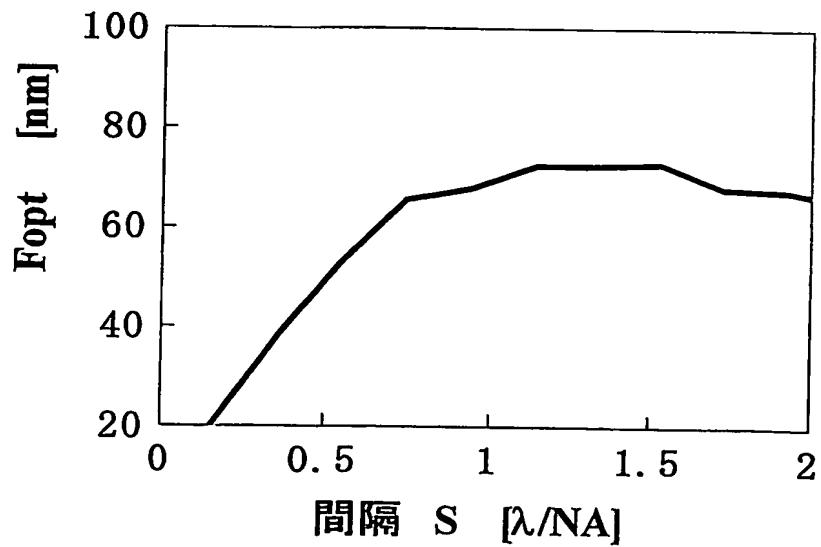
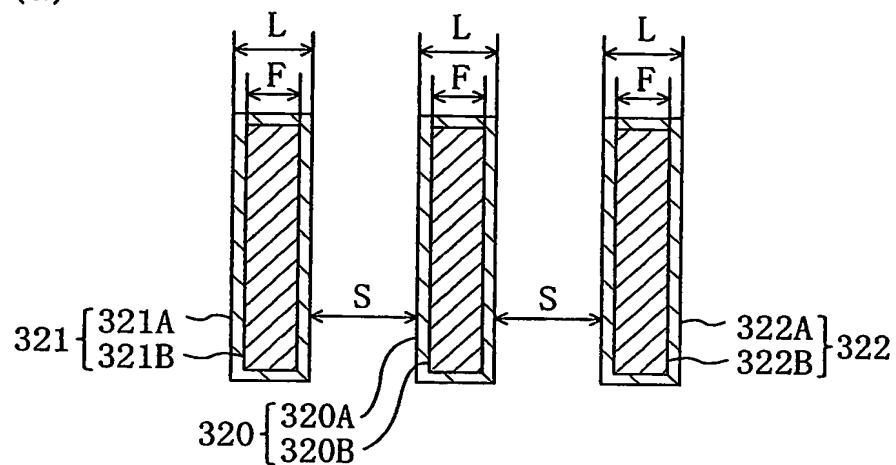
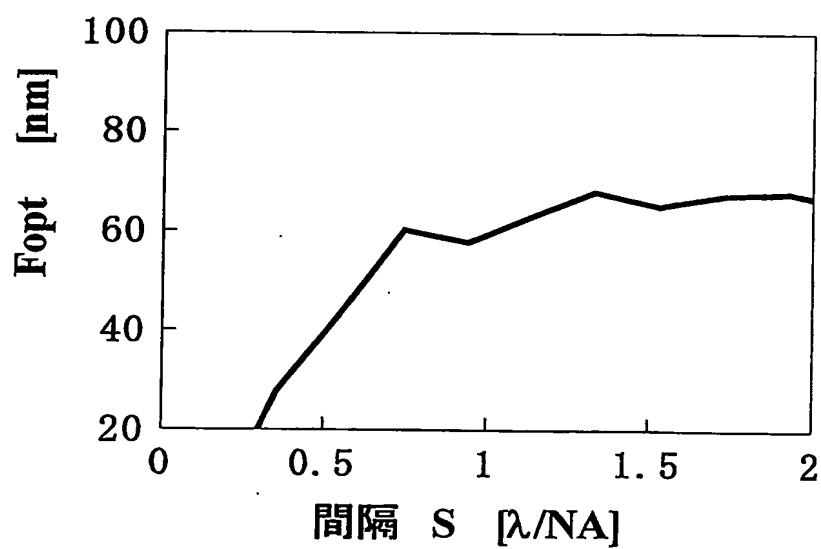


FIG. 10

(a)



(b)



10/18

FIG. 11

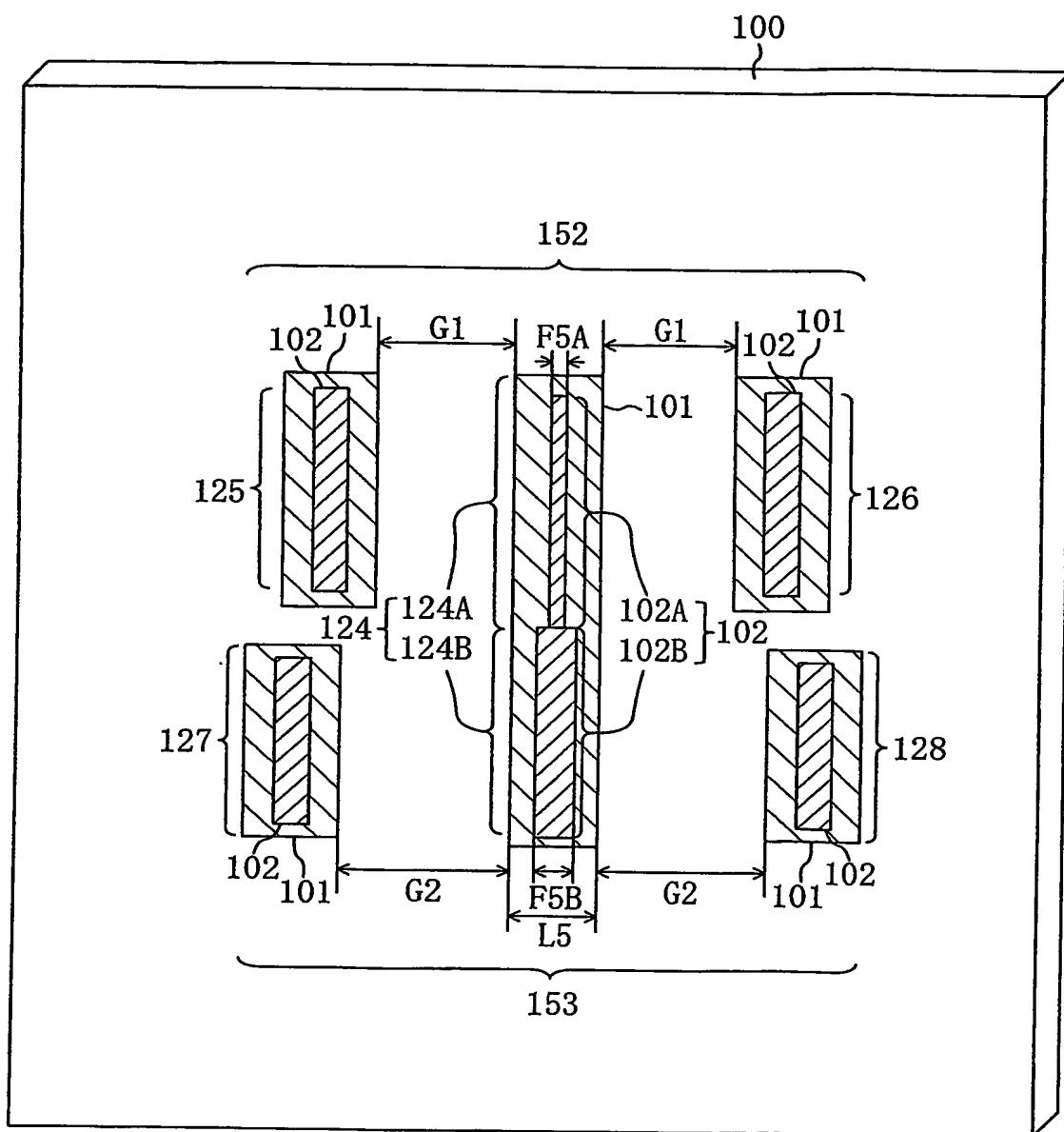


FIG. 12

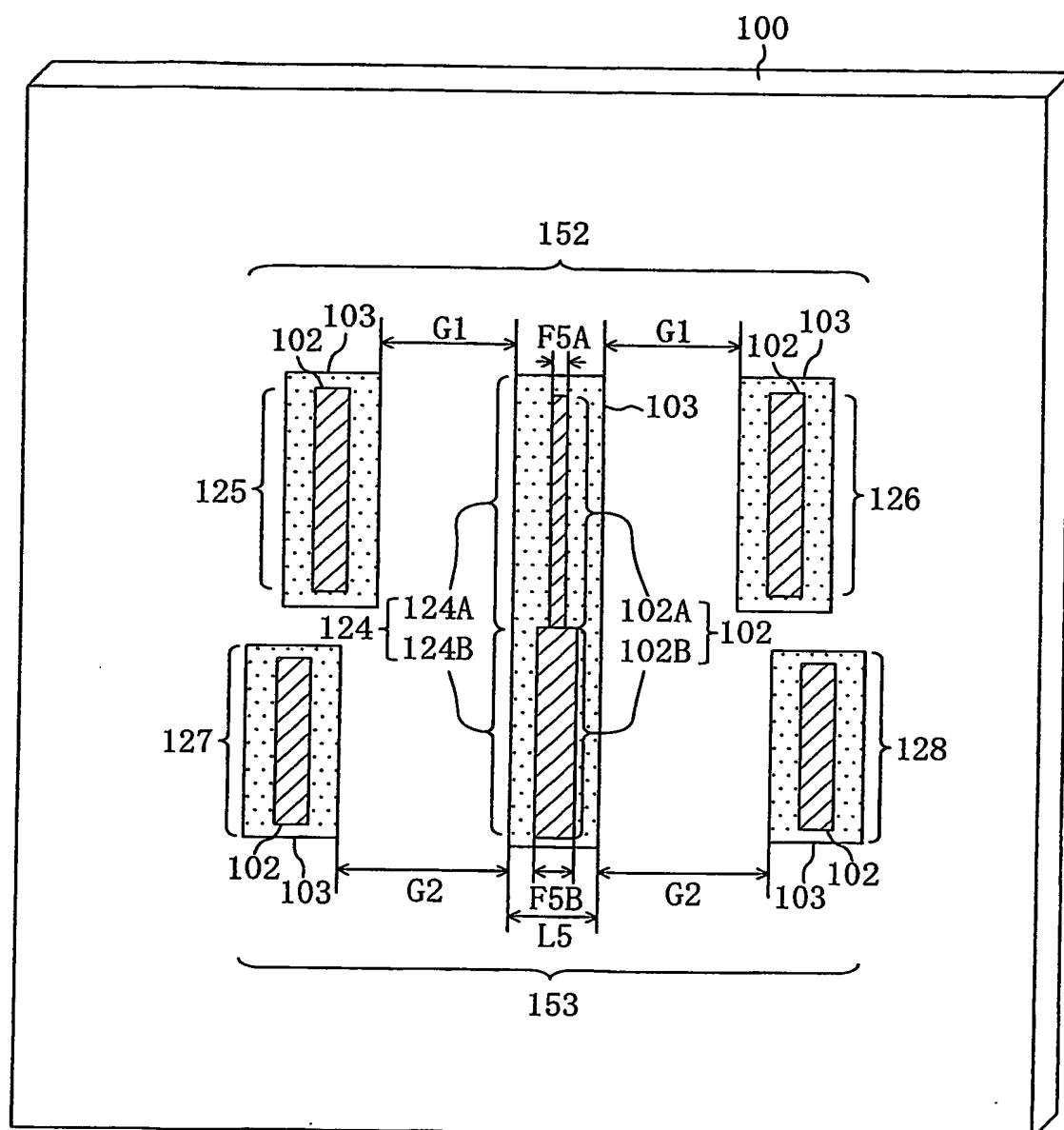


FIG. 13

12/18

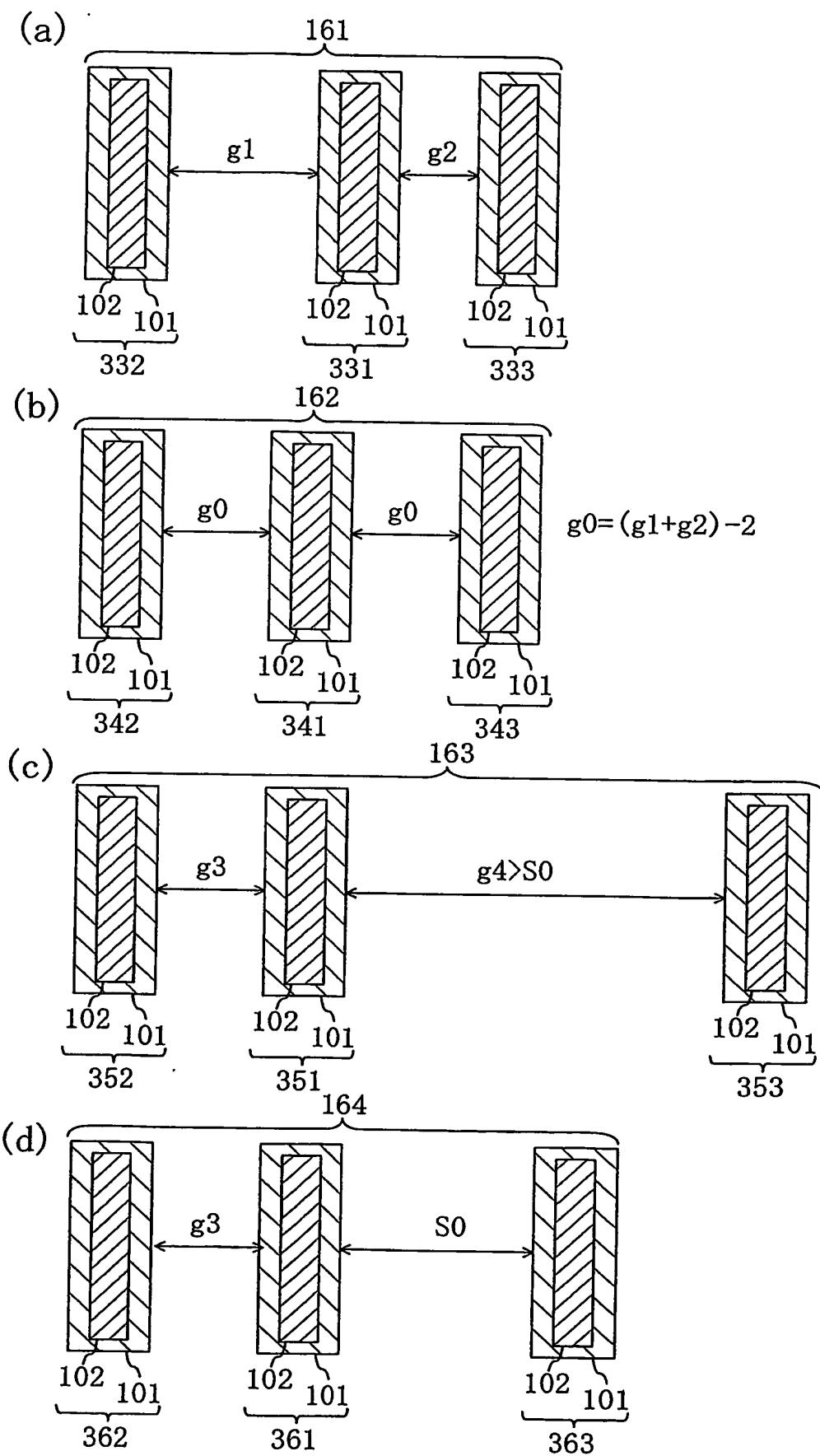


FIG. 14

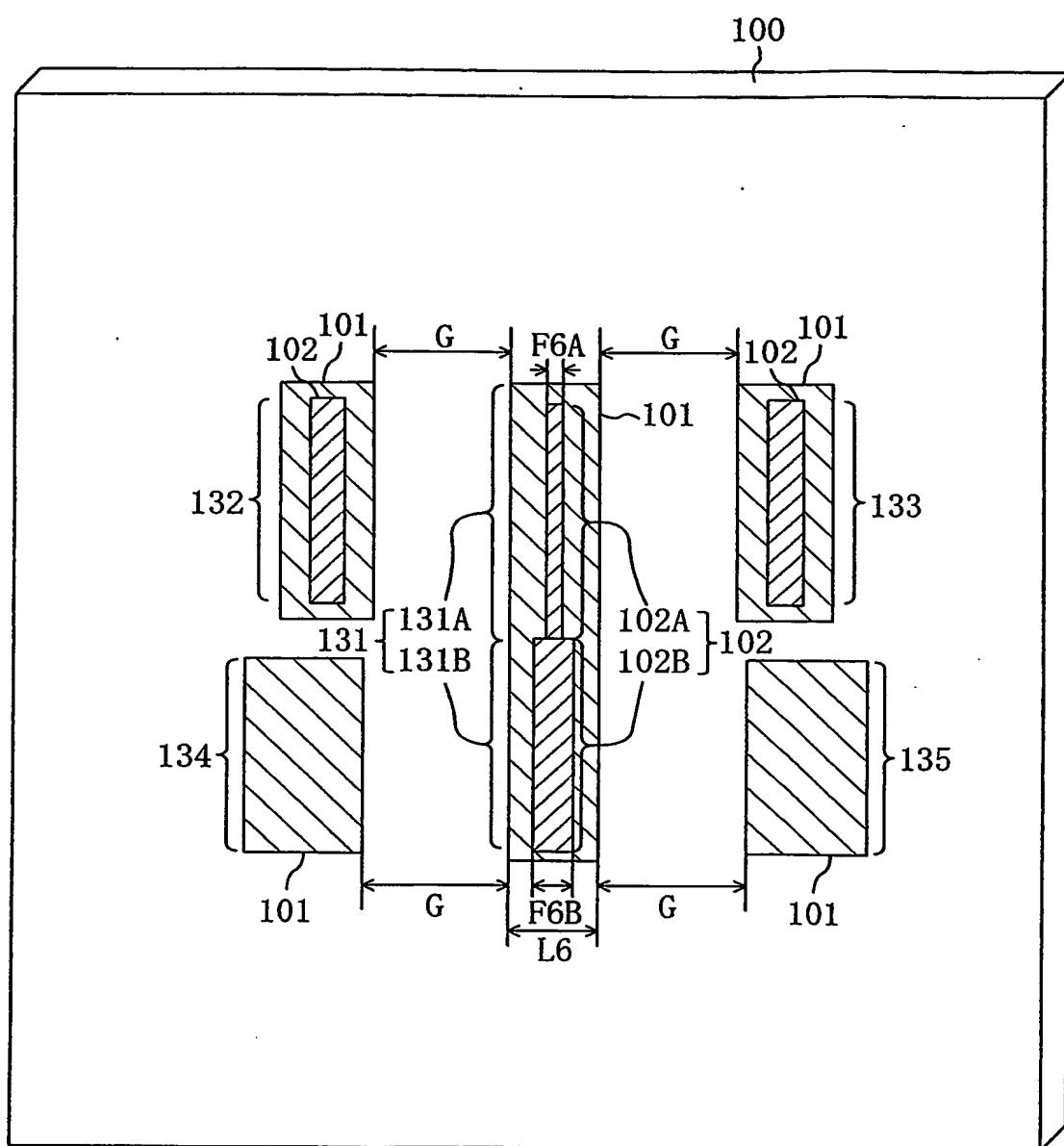


FIG. 15

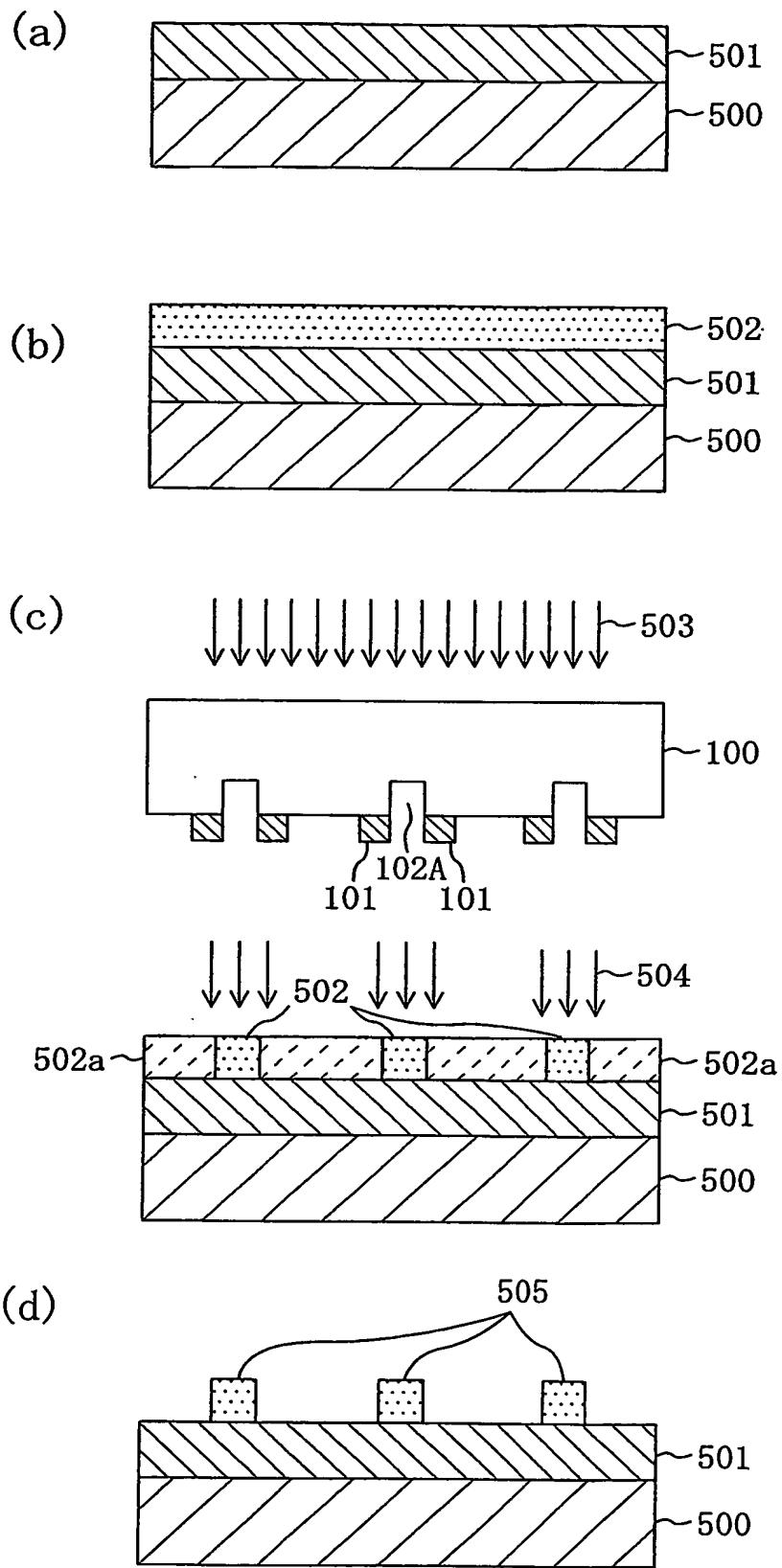
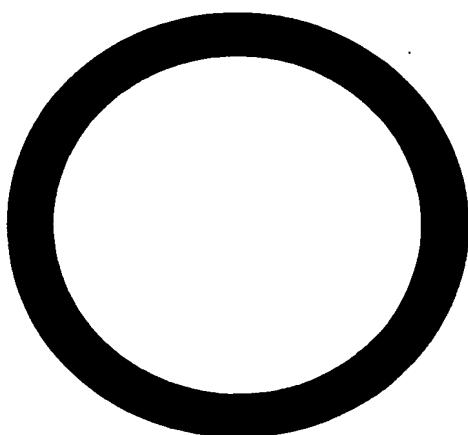
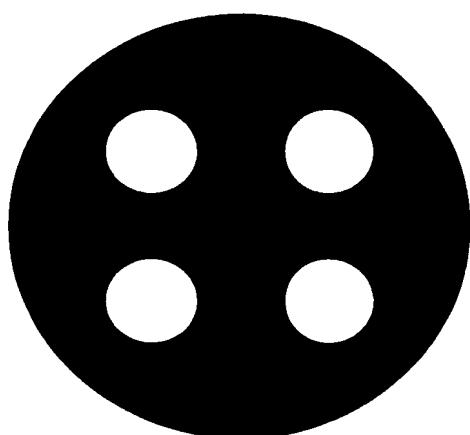


FIG. 16

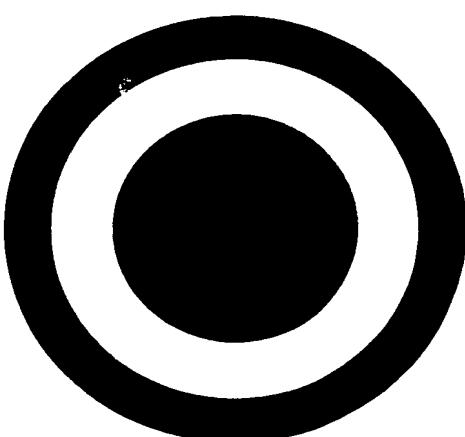
(a) 通常露光光源



(c) 四重極露光光源



(b) 輪帶露光光源



(d) 輪帶一四重極混成型露光光源

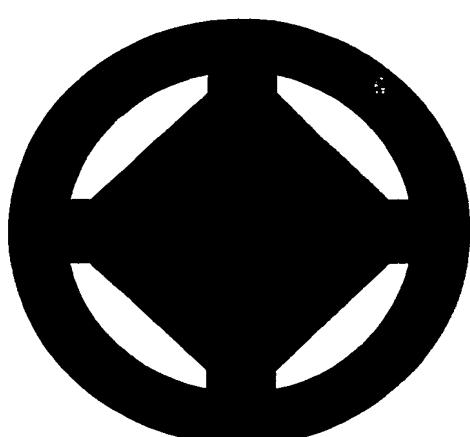
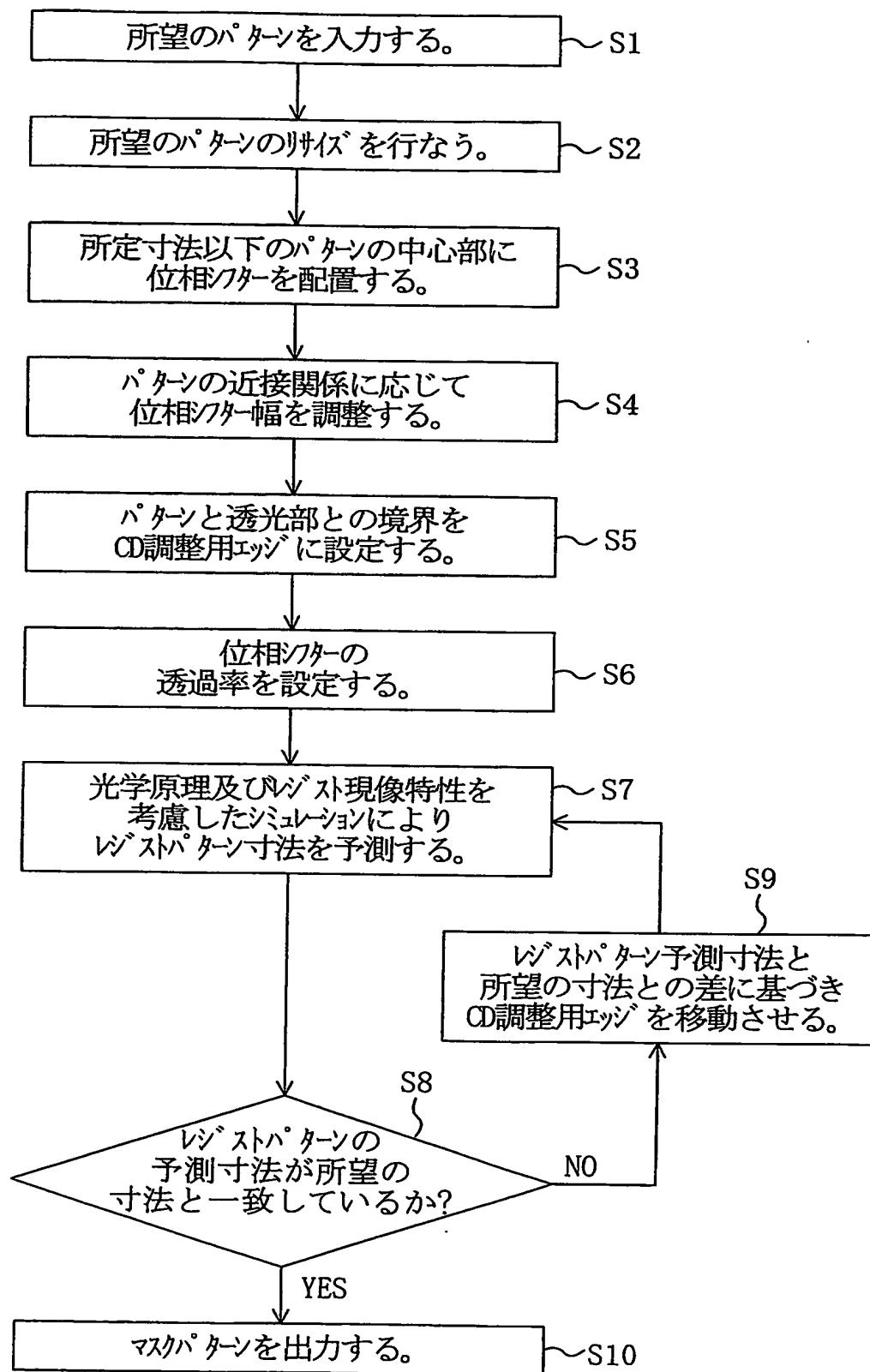
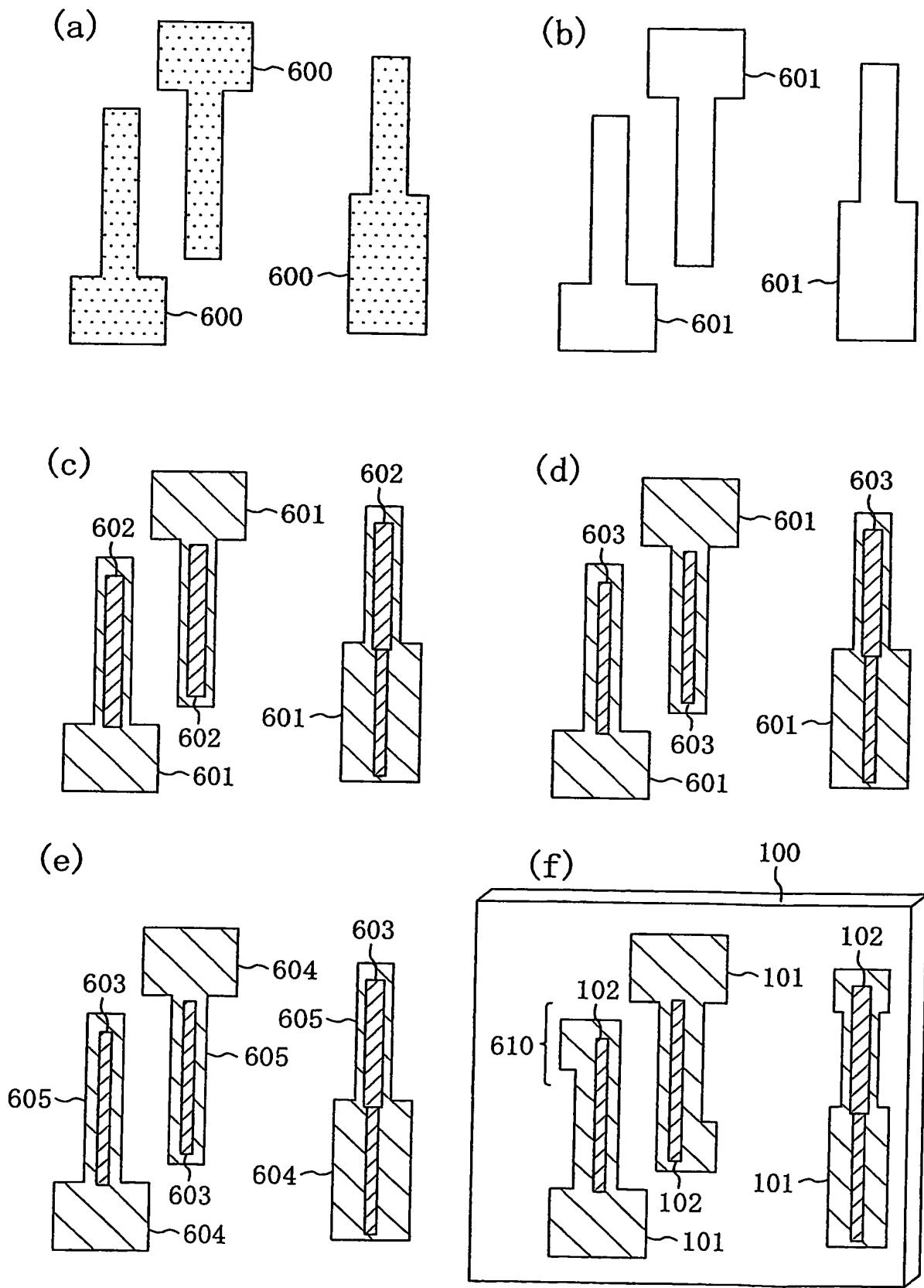


FIG. 17



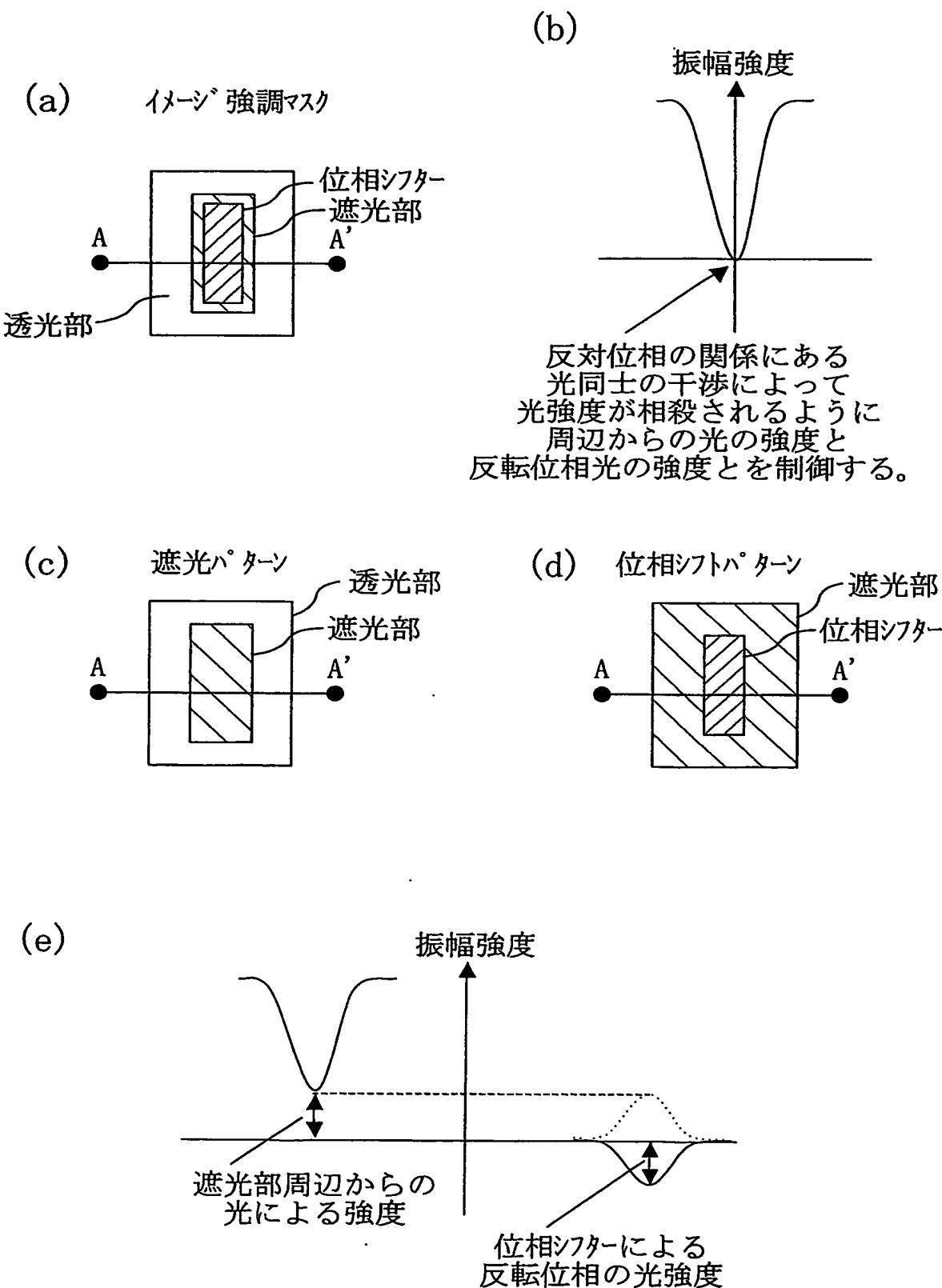
17/18

FIG. 18



18/18

FIG. 19



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/014143

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ G03F1/08, H01L21/027, G06F17/50

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G03F1/08, H01L21/027, G06F17/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2004
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2004 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2004

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 8-22114 A (LG Semicon Co., Ltd.), 23 January, 1996 (23.01.96), Fig. 6; Par. Nos. [0012] to [0013] (Family: none)	1-3, 5, 6, 10, 11, 18-20, 8, 9, 21-29
X	WO 02/091079 A1 (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 14 November, 2002 (14.11.02), The 2nd mode, the 4th mode; Fig. 42	1-7, 10-20
A	& JP 2003-21891 A & TW 538455 A & EP 1365288 A1 & KR 03/76244 A & US 2004/0029023 A1	8, 9, 21-29

 Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
21 October, 2004 (21.10.04)Date of mailing of the international search report
09 November, 2004 (09.11.04)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/014143

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 3-170928 A (Fujitsu Ltd.), 24 July, 1991 (24.07.91), Fig. 1 (Family: none)	1-3, 5, 6, 10, 11, 18-20
A	WO 01/35166 A1 (Matsushita Electronics Corp.), 17 May, 2001 (17.05.01), Abstract & TW 466584 A & EP 1241523 A1 & CN 1373861 A & KR 03/8211 A & JP 2001-536639 A & US 6703168 B1	1-29
A	US 5718829 A (Micron Technology, Inc.), 17 February, 1998 (17.02.98), Abstract (Family: none)	1-29
A	EP 0401795 A2 (Oki Electric Industry Co., Ltd.), Abstract & JP 3-11345 A & JP 3-177841 A	1-29
A	JP 2001-174974 A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 29 June, 2001 (29.06.01), Abstract (Family: none)	24-29

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. C17 G03F1/08, H01L21/027, G06F17/50

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. C17 G03F1/08, H01L21/027, G06F17/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2004年
 日本国登録実用新案公報 1994-2004年
 日本国実用新案登録公報 1996-2004年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	J P 8-22114 A (エルジイ・セミコン・カンパニイ・リミテッド) 1996. 01. 23 図6, 【0012】-【0013】 (ファミリーなし)	1-3, 5, 6, 10, 11, 18-20
A		8, 9, 21-29

 C欄の続きにも文献が列挙されている。 パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であつて出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」特に関連のある文献であつて、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」特に関連のある文献であつて、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

21. 10. 2004

国際調査報告の発送日

09.11.2004

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目 4番 3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

多田 達也

2M 3011

電話番号 03-3581-1101 内線 3274

C(続き) 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	WO 02/091079 A1 (松下電器産業株式会社) 2002. 11. 14 第2の実施形態、第4の実施形態、Fig. 42 & JP 2003-21891 A & TW 538455 A & EP 1365288 A1 & KR 03/76244 A & US 2004/0029023 A1	1-7, 10-20
A		8, 9, 21-29
X	JP 3-170928 A (富士通株式会社) 1991. 07. 24 第1図 (ファミリーなし)	1-3, 5, 6, 10, 11, 18-20
A	WO 01/35166 A1 (松下電子工業株式会社) 2001. 05. 17 要約 & TW 466584 A & EP 1241523 A1 & CN 1373861 A & KR 03/8211 A & JP 2001-536639 A & US 6703168 B1	1-29
A	US 5718829 A (Micron Technology, Inc.) 1998. 02. 17 要約 (ファミリーなし)	1-29
A	EP 0401795 A2 (Oki Electric Industry Company, Limited) 要約 & JP 3-11345 A & JP 3-177841 A	1-29
A	JP 2001-174974 A (松下電器産業株式会社) 2001. 06. 29 要約 (ファミリーなし)	24-29